

VŠB - Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra robotiky

Zdrojový subsystém pro mobilní robotiku

Power Subsystem for Mobile Robotics

Student:

Bc. Jan Johech

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Ján Babjak, PhD.

Ostrava 2018

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Jan Joheć**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2301T013 Robotika
Téma: **Zdrojový subsystém pro mobilní robotiku**
Power Subsystem for Mobile Robotics
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Navrhněte a realizujte univerzální elektronický modul pro zajištění BMS služeb a služeb monitoringu spotřeby pro mobilní roboty.
2. Připravte možnost integrace daného modulu do vybraného robotu na katedře.
3. Na základě testů demonstřujte funkčnost modulu.
4. Vytvořte základní SW komponentu pro komunikaci a ovládání daného modulu.
5. Výše uvedené kroky vhodně zdokumentujte a včetně SW dodejte na CD.

Seznam doporučené odborné literatury:

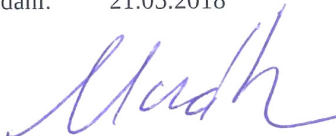
- 1) NOVÁK, P.: Mobilní roboty – pohony, senzory, řízení. Nakladatelství BEN – technická literatura Praha, 250s, 2005. ISBN: 80-7300-141-1.
- 2) ARENDÁŠ M., RUČKA, M., Nabíječky a nabíjení, Miroslav , 3. upravené vydání 2005, vydalo BEN - technická literatura. ISBN: 80-86056-61-9
- 3) NOVÁK, P.: Mikropočítačové řídicí systémy. 1. vyd. Ostrava: VŠB, 2002. ISBN: 80-248-0291-8.
- 4) VÁŇA, V.: ARM pro začátečníky, BEN Praha, 2009, 196 stran, ISBN: 978-80-7300-246-6
- 5) dokumentace k použitým součástkám v elektronické podobě

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

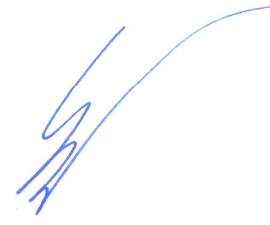
Vedoucí diplomové práce: **Ing. Ján Babjak, Ph.D.**

Datum zadání: 08.12.2017

Datum odevzdání: 21.05.2018


prof. Dr. Ing. Petr Novák
vedoucí katedry




doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 19.05.2018

.....

podpis studenta

Prohlášení o využití výsledků práce

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на вѣдомі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít toto dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на вѣдомі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 19.05.2018

.....

podpis studenta

Jméno a příjmení autora práce:

Jan Johec

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Poloviční 281, Ostrava - Lhotka
Česká republika

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

JOCHEC, J. Zdrojový subsystém pro mobilní robotiku: Diplomová práce. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra robotiky, 2018, **58 s.** Vedoucí práce: Ing. Ján Babjak, PhD.

Diplomová práce se zabývá vývojem univerzálního zdrojového subsystému pro mobilní robotiku. V práci byla nejprve provedena rešerše typů akumulátorů a dostupných řešení bateriového managementu, včetně realizace konkrétního BPS firmy Texas Instruments. Následně byly specifikovány požadavky na kompletní zdrojový modul pro mobilní roboty s 24V napájecí sítí. Dále bylo navrženo kompletní schéma zapojení tohoto modulu, který zahrnuje BMS, řídicí MCU, napájecí a měřicí obvody a komunikační periferie. Všechny tyto systémy byly poté integrovány na desku plošných spojů, která byla následně realizována a byly otestovány její funkce. Pro demonstraci některých funkcí a snadnější integraci modulu do mobilního robotu byla vytvořena aplikace pro PC.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

JOCHEC, J. Power Subsystem for Mobile Robotics: Masters Thesis. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Robotics, 2018, **58p.** Thesis head: Ing. Ján Babjak, PhD.

This master thesis concerns design and realization of universal power supply module for mobile robotics. First, a brief research of battery types and available solutions of battery management systems has been performed, including realization of specific BPS module of the Texas Instruments company. Then, supply module total requirements has been specified for 24V supply network robots. Next, complete electrical schematic of the module has been designed, including BMS, MCU, supply and measurement circuits and communication peripheries. Subsequently, all mentioned systems has been integrated to single PCB, which has been manufactured and tested. For demonstrational purposes and easier implementation of this module to a mobile robot, PC application has been created.

Obsah

Seznam obrázků.....	- 7 -
Seznam tabulek.....	- 9 -
Seznam použitých zkratk a terminů.....	- 10 -
1 Úvod	- 12 -
1.1 Zadání	- 12 -
1.2 Úvod do problematiky napájení mobilních robotů	- 12 -
2 Rešerše typů akumulátorů a obvodů pro práci s nimi	- 12 -
2.1 Typy akumulátorů a jejich provozní parametry	- 12 -
2.2 Obvody BMS a BPS	- 14 -
2.2.1 Zavedení pojmů a popis funkce.....	- 14 -
2.2.2 Typy ochran.....	- 15 -
2.3 Testovaný BPS systém.....	- 15 -
3 Požadavky na zdrojový subsystém MR.....	- 17 -
3.1 Požadavkový list	- 17 -
3.1.1 Obecné požadavky na zdrojový subsystém.....	- 17 -
3.1.2 Požadavky na BMS	- 17 -
3.1.3 Požadavky na design	- 18 -
4 Technické řešení zdrojového subsystému	- 18 -
4.1 Postup řešení	- 18 -
4.2 Návrh BMS	- 19 -
4.2.1 Volba kompatibilních baterií	- 19 -
4.2.2 Volba integrovaných obvodů	- 20 -
4.2.3 Blokové schéma a popis funkce	- 21 -
4.2.4 AFE (Analog Front End)	- 22 -
4.2.5 Gas Gauge	- 25 -
4.3 Testování a konfigurace BMS	- 27 -

4.3.1	Zapojení a oživení BMS	- 28 -
4.3.2	Konfigurace v SW Battery Management Studio	- 29 -
4.3.3	Propojení BMS s testovacím MCU modulem	- 31 -
4.4	Návrh zdrojového subsystému	- 32 -
4.4.1	Blokové schéma	- 33 -
4.4.2	Volba, konfigurace a implementace MCU	- 33 -
4.4.3	Implementace BMS	- 38 -
4.4.4	Nabíjecí modul	- 39 -
4.4.5	Napájecí, měřicí a spínací periferie	- 40 -
4.4.6	Komunikační periferie	- 43 -
4.4.7	Ostatní systémy	- 46 -
4.5	PCB Design	- 47 -
4.6	Testování zdrojového subsystému	- 50 -
4.6.1	Oživení	- 51 -
4.6.2	Propojení s PC a programování MCU	- 52 -
4.6.3	SW Komponenta pro PC	- 52 -
5	Závěr	- 54 -
6	Použité zdroje a literatura:	- 56 -
7	Seznam příloh	- 58 -

Seznam obrázků

Obr. 1 – Rešerše typů akumulátorů	- 13 -
Obr. 2 – Testovaný BPS – Schéma zapojení	- 16 -
Obr. 3 – Testovaný BPS – Vyrobený PCB.....	- 16 -
Obr. 4 – Typy baterie.....	- 19 -
Obr. 5 – Využití zvolených IO – zjednodušené schéma.....	- 20 -
Obr. 6 – Blokové schéma BMS	- 21 -
Obr. 7 – AFE – Chip pinout	- 22 -
Obr. 8 – AFE - Schéma zapojení 1/2.....	- 23 -
Obr. 9 – AFE - Schéma zapojení 2/2.....	- 24 -
Obr. 10 – Balancér - Schéma zapojení	- 25 -
Obr. 11 – Gas Gauge – Chip pinout	- 25 -
Obr. 12 – Gas Gauge – el. schéma zapojení.....	- 26 -
Obr. 13 – BMS – Vyrobený PCB 1/2.....	- 27 -
Obr. 14 – BMS – Vyrobený PCB 2/2.....	- 28 -
Obr. 15 – BMS + EV2300	- 29 -
Obr. 16 – Battery Management Studio	- 30 -
Obr. 17 – Battery Management Studio – kalibrace	- 30 -
Obr. 18 – BMS + STM32 Nucleo kit	- 31 -
Obr. 19 – Blokové schéma celého systému.....	- 33 -
Obr. 20 – STM32 CUBE – Konfigurace chipu	- 34 -
Obr. 21 – Schéma zapojení MCU – Krystaly.....	- 35 -
Obr. 22 – Schéma zapojení MCU – Napájení 1/3	- 35 -
Obr. 23 – Schéma zapojení MCU – Napájení 2/3	- 36 -
Obr. 24 – Schéma zapojení MCU – Napájení 3/3	- 37 -
Obr. 25 – Schéma zapojení MCU – SWD a Reset.....	- 37 -
Obr. 26 – Schéma zapojení MCU – BMS	- 38 -
Obr. 27 – Nabíječka – Modul LTC3780.....	- 39 -
Obr. 28 – Nabíječka – Schéma řízení	- 40 -
Obr. 29 – DC-DC měnič 5V – Schéma zapojení.....	- 41 -

Obr. 30 – nastavitelný DC-DC měnič	- 42 -
Obr. 31 – DC-DC měnič AUX – Schéma zapojení	- 42 -
Obr. 32 – Spínaný AUX výstup – Schéma zapojení	- 43 -
Obr. 33 – UART/RS232 – Schéma zapojení	- 44 -
Obr. 34 – CAN – Schéma zapojení	- 45 -
Obr. 35 – Ethernet modul – Schéma zapojení	- 45 -
Obr. 36 – Řízení ventilátorů – Schéma zapojení	- 46 -
Obr. 37 – Paměť Quad SPI – Schéma zapojení	- 46 -
Obr. 38 – Tlačítka – Schéma zapojení	- 47 -
Obr. 39 – PCB – Návrh	- 48 -
Obr. 40 – PCB – Popis	- 49 -
Obr. 41 – Vyrobený PCB	- 50 -
Obr. 42 – Diagnostika AFE	- 51 -
Obr. 43 – Převodník USB - UART	- 52 -
Obr. 44 – Keil – Komunikace po SMBus – Zdrojový kód	- 52 -
Obr. 45 – Aplikace pro PC	- 53 -

Seznam tabulek

Tab. 1 – Provozní parametry akumulátorů - 15 -

Tab. 2 - AFE Cell map - 28 -

Seznam použitých zkratk a terminů

Zkratka	Význam
ADC	AD Převodník / Analog-Digital Converter
BMS	Systém pro správu baterií / Battery Management System
BPS	Systém pro ochranu baterií / Battery Protection System
COM	Sériový port (RS-232)
EEPROM	Paměť pro uchování systémových nastavení
EVM	Vývojový modul / Evaluation Module
FET	Tranzistor řízený polem / Field Effect Transistor
GND	Zem, neboli (-) / Ground
GPIO	Vstupně-výstupní pin / General Pin Input Output
HAL	Typ knihovny pro MCU / High Abstract Layer
IO	Integrovaný obvod
LFP	Litium železo fosfátová bat./ Lithium Ferro-Phosphate
MCU	Mikrokontrolér / Micro-Controller Unit
MOS-FET	Druh tranzistoru řízeného polem / Metal Oxide Semicon.
MR	Mobilní Robot / Mobilní Robotika
OZ	Operační Zesilovač
PC	Počítač, ať už osobní nebo jako řídicí systém
PCB	Deska plošných spojů / Printed Circuit Board
PWM	Pulzně-šířková modulace / Pulse Width Modulation
RAM	Operační paměť - po vypnutí se vymaže
RTC Modul	Modul reálného času / Real-Time Clock
USB	Universální sériová sběrnice
WOL	Technologie umožňující probuzení po LAN / Wake On Lan

Termín	Význam
Analogový vstup/výstup	Vstup/výstup přenášející napěťovou úroveň
Analog Front End (AFE)	Obvod sloužící k měření analogových hodnot a jejich interpretaci po sběrnici.
Gas Gauge	Obvod sloužící k dlouhodobému logování el. veličin a výpočtu zbývajících kapacity a času baterie.
Defaultní	Výchozí
Digitální vstup/výstup	Vstup/výstup nabývajících hodnoty 0 nebo 1
Hexadecimální (proměnná)	Nabývá hodnoty 0-F
Pull UP Rezistory	Rezistory přivádějící kladné napětí na sběrnici
Subsystem	Dílčí prvek systému
Buck DC-DC měnič	Snižující DC-DC měnič
Boost DC-DC měnič	Zvyšující DC-DC měnič
LDO Regulátor napětí	Reg. s nízkým úbytkem napětí (Low-Drop-Out)

1 Úvod

1.1 Zadání

Zadáním diplomové práce je v první fázi navrhnout a následně i realizovat elektronický modul pro zajištění BMS služeb a služeb monitoringu spotřeby pro mobilní roboty. Modul má být připraven k integraci do konkrétního robotu na katedře. Ve druhé fázi bude modul otestován a na základě testů bude demonstrována jeho funkčnost. Ve fázi třetí pak bude vytvořena jednoduchá SW komponenta pro komunikaci s modulem.

1.2 Úvod do problematiky napájení mobilních robotů

Mobilita MR nezávisí pouze na schopnosti jeho lokomočního ústrojí prostupovat terénem, ale také na schopnosti napájecího subsystému dodávat potřebné množství energie pro tento pohyb a současně napájet i další subsystémy MR. Jako zdroje energie v těchto aplikacích se s úspěchem nasazují baterie, které v dnešní době již disponují dobrým poměrem hmotnosti a kapacity.

Zdrojový subsystém má zajistit baterii její provozní parametry, být schopen napájet všechny ostatní subsystémy v robotu a současně měřit provozní veličiny. Tyto naměřené hodnoty má pak být schopen dodat nadřazenému systému k vyhodnocení či odeslání do stanice operátora.

2 Rešerše typů akumulátorů a obvodů pro práci s nimi

Protože elektrickou energii nelze přímo efektivně skladovat, jsou zdrojem energie v MR nejčastěji akumulátory. Existuje celá řada různých druhů lišících se nejen svým chemickým složením a fyzikálními vlastnostmi ale rovněž svou cenou.

2.1 Typy akumulátorů a jejich provozní parametry

Kompletní rešerše typů akumulátorů byla již provedena v rámci bakalářské práce, proto zde budou pouze interpretovány její výsledky dle [1].

Typ / Značení	Napětí [V]	Energie/hmotnost [Wh/kg]	Energie/objem [Wh/l]	Životnost [cyklů]
Olověný (Pb)	2	20 – 40	40 – 50	500 – 800
Ni-Mh	1,2	30 – 120	140 – 300	500 – 2000
Ni-Cd	1,2	40 – 70	50 – 150	cca 2000
Li-Ion	3,7	100 – 200	240 – 530	400 – 1200
Li-Pol	3,7	100 – 265	330 – 730	500 – 1000
Li-Fe-Po ₄	3,2	90 – 150	220 – 330	cca 2000



Nedodržení provozních parametrů:

- Li-Fe-Po₄ - Snížení životnosti, nafukování, únik elektrolytu
- Li-Ion - Snížení životnosti, přehřátí, riziko vzplanutí
- Li-Pol - Snížení životnosti, riziko vzplanutí / exploze

Obr. 1 – Rešerše typů akumulátorů

Jak vyplývá z Obr. 1, akumulátory s nejlepším poměrem energie na jednotku hmotnosti jsou jednoznačně akumulátory Li-Ion, Li-Pol a Li-Fe-Po₄ (LFP), tedy akumulátory na bázi Lithia. Tyto akumulátory navíc často nabízejí krátkodobou přetížitelnost v řádu desetinásobků své kapacity a to i při zachování poměrně vysoké životnosti.

Všechny tyto typy akumulátorů však spojuje poměrně velká náchylnost na zničení vlivem nedodržování provozních parametrů, na rozdíl od jejich předchůdců. Zejména akumulátory Li-Pol mohou při nesprávném zacházení znamenat vážné bezpečnostní riziko. Z tohoto důvodu je nezbytně nutné tyto akumulátory během jejich používání chránit, a zajistit jim dodržení všech následujících provozních parametrů:

- Maximální a minimální provozní napětí na článek
- Maximální trvalý vybíjecí proud
- Maximální trvalý nabíjecí proud
- Maximální povolené přetížení za jednotku času
- Maximální a minimální provozní teplota

Mezi další provozní parametry akumulátorů patří:

- Nominální napětí
- Počet článků v packu
- Životnost (počet cyklů)
- Vnitřní odpor, atd..

Provozní parametry je u většiny známých výrobců možno vyčíst z katalogového listu.

2.2 Obvody BMS a BPS

Pro správné zacházení s akumulátory (dále jen baterie, z angl. battery) vznikla specifická oblast elektroniky zabývající se jak jejich ochranu, tak případně i monitoringem provozních parametrů a jejich interpretací nadřazenému systému.

2.2.1 Zavedení pojmů a popis funkce

Jakékoli sériově vyráběné zařízení, které má vestavěnou lithiovou baterii, musí současně obsahovat více či méně sofistikovaný systém bateriové ochrany, případně i monitoringu. Tyto obvody se obecně nazývají Battery Management Systémy (BMS), jejich podmnožinou jsou pak Battery Protection Systémy (BPS).

BPS – Battery Protection Systémem rozumíme systém, který zajišťuje pouze ochranu baterie. Jedná se o jednodušší systémy, které mají často pevně nastavené prahové hodnoty ochrany a jsou obvykle určeny k nasazení v kombinaci s určitými konkrétními typy baterie (např. 3-5S, Li-Ion). Korekce systému se obvykle provádí na úrovni el. součástek. Samotný BPS pak provádí měření elektrických veličin na baterii pouze pro vlastní potřebu a porovnává je s prahovými hodnotami nastavenými výrobcem. BPS systémy obvykle nedokáží měřená data nijak navenek interpretovat, takže samy o sobě nemohou být využity k monitoringu. Nutno podotknout, že tyto systémy se obvykle využívají tam, kde není baterie součástí systému, a bývá alespoň jednou za čas nabíjena mimo systém, který napájí. BPS totiž ve většině případů neobsahuje balancér (*cit. [1] str. 23*), takže musí být jednou za čas baterie vyjmuta a pomocí nabíječky s balancérem dobita a vyvážena. U jednočláňkových baterií to samozřejmě neplatí.

BMS – Battery Management Systémem rozumíme systém, který je schopen zajistit jak ochranu baterie, která je vždy nadřazena ostatním funkcím, tak případně monitoring elektrických veličin a jejich interpretaci nadřazenému systému. Jedná se obvykle o komplexní řešení napájecího systému, včetně balancéru a všech potřebných periférií. BMS systémy bývají obvykle vybaveny nějakou komunikační sběrnici, po které je možno jak číst data o baterii, tak případně systém konfigurovat a řídit. Tyto systémy bývají obvykle nezávislé na chemii baterie a je možno u nich přímo po sběrnici nastavit prahové hodnoty jednotlivých ochrany.

V případě, že je BPS vhodně doplněn o sensory elektrických veličin snímané nadřazeným MCU, je možno z něj získávat stejná data jako z BMS. V tomto případě je ovšem nutné počítat s vyšší spotřebou a tedy i vybitím baterie i v době nečinnosti, protože nadřazený

systém musí být neustále napájen. Další nevýhodou tohoto řešení může být poměrně velké množství externích součástek a nutnost vytvořit si vlastní algoritmus pro výpočet např. zbývajících času či stavu baterie.

2.2.2 Typy ochran

Ochrany, ať už pevně nastavené v případě BPS, nebo programovatelné v případě BMS vždy pracují s prahovými hodnotami (tzv. Thresholdy) pro jednotlivé parametry baterie.

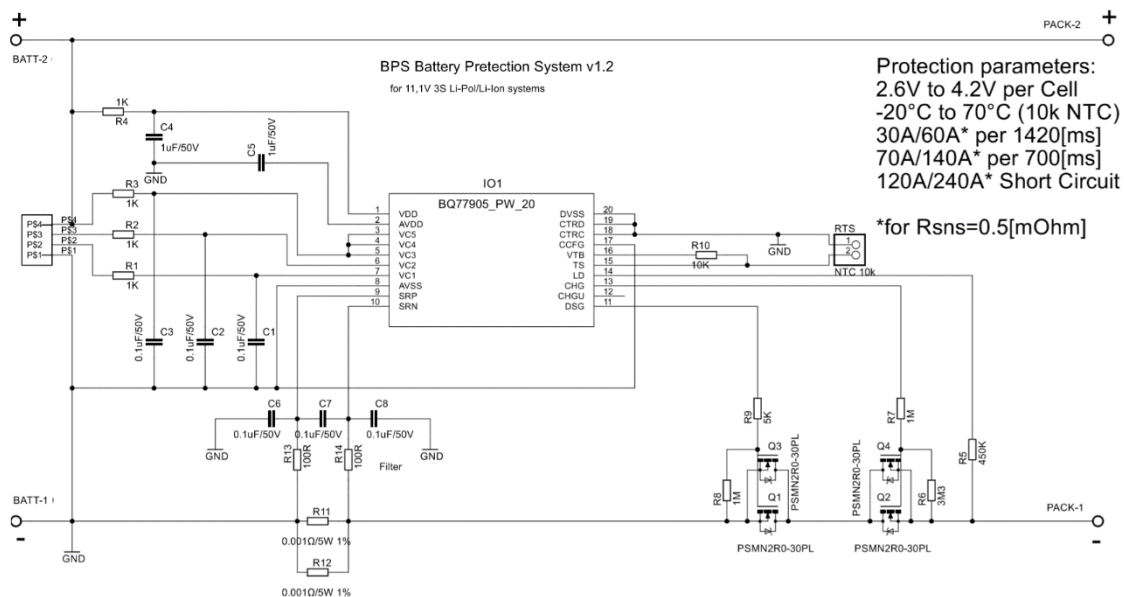
Provozní parametry akumulátorů		
Parametr	Ochrana (Threshold)	Jednotka
Maximální a minimální provozní napětí na článek	OVP – Over-Voltage-Protection UVP – Under-Voltage-Protection	[V]
Maximální trvalý vybíjecí proud	OCP – Over-Current-Protection (DOCP – Discharge-OCP)	[A]
Maximální nabíjecí vybíjecí proud	OCP – Over-Current-Protection (COCP – Charge-OCP)	[A]
Maximální povolené přetížení	OCP – Over-Current-Protection OCT – Over-Current-Timeout	[A] [s]
Maximální a minimální provozní teplota	OTP – Over-Temperature-Protection UTP – Under-Temperature-Protection	[°C]

Tab. 1 – Provozní parametry akumulátorů

V případě, že bude některá z prahových hodnot překročena, BMS (BPS) musí zajistit okamžité odpojení baterie od systému. V případě BPS, kde jsou hodnoty pevně HW nastaveny, se vždy podle katalogu vybírá varianta IO na míru dané baterie. Je tedy vždy k dispozici pouze omezené množství BPS, které vyhovují parametrům dané baterie.

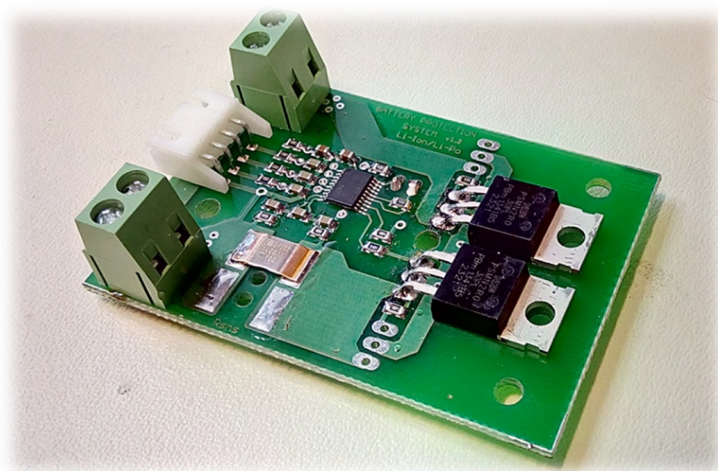
2.3 Testovaný BPS systém

V rámci testování technologií pro potřeby diplomové práce a požadavků katedry robotiky byl vyvinut BPS pro 12V bateriově napájené roboty. Zvolená baterie měla být 3S Li-Pol s maximálním dovoleným odběrem do 30A trvale. Na základě těchto požadavků byl navržen a otestován BPS postavený na IO firmy Texas Instruments BQ77905. Tento obvod je možno využít pouze pro 3-5článekové baterie typu Li-Ion nebo Li-Pol, z důvodu pevně nastaveného ochranného rozsahu na článek. Ostatní níže uvedené parametry na Obr. 2 vpravo jsou rovněž pevně nastavené, avšak nikoli přímo v IO, ale hodnotou externích součástek. Tyto parametry je tedy možno při návrhu do určité míry měnit.



Obr. 2 – Testovaný BPS – Schéma zapojení

Ve schématu na Obr. 2 je zřetelně vidět, jakým způsobem se provádí konfigurace počtu článků v případě tohoto IO. Vývody pro články VC3-VC5 jsou jednoduše zkratovány mezi sebou, a pin CCFG (Cell-Configuration), kterým IO detekuje počet článků je pro tříčlávkové aplikace připojen na AVSS, tedy na GND. Na základě této informace obvod po připojení baterie na svorky BATT provede všechny tři články, a pokud odpovídají jejich provozní parametry parametrům uvedeným výše, pomocí MOS-FETů Q1-Q4 dojde k připojení baterie k výstupním svorkám PACK.



Obr. 3 – Testovaný BPS – Vyrobený PCB

Na Obr. 3 je vidět možnost rekonfigurace desky pro větší proudy přidáním paralelního snímacího rezistoru spolu s další dvojicí MOS-FETů. Všechny soubory pro design tohoto systému, včetně katalogových listů k jednotlivým součástkám, jsou přiloženy v příloze [6]

3 Požadavky na zdrojový subsystém MR

Na základě zadání a výše uvedené rešerše byl zvolen k realizaci Battery Management Systém doplněný o mikro-kontrolér. Tyto dva systémy, rozšířeny o měřicí, spínací a komunikační periferie, utvoří celek kompletního zdrojového subsystému pro MR.

3.1 Požadavkový list

Požadavkový list byl rozdělen do tří následujících kategorií:

3.1.1 Obecné požadavky na zdrojový subsystém

- Zajištění napájení pohonů a výkonových členů MR
- Komunikace s řídicím systémem robotu a odesílání aktuálního stavu baterie
- Zajištění napájení řídicího systému, senzorů a periférií robotu
- Měření proudů v jednotlivých větvích
- Možnost zapnout/vypnout jednotlivé větve
- Možnost připojení tlačítka CENTRAL STOP
- Možnost připojení a spínání (regulace) ventilátoru

3.1.2 Požadavky na BMS

- Ochrana baterie proti: přebíjení, podbití, přetížení, zkratu a přehřátí (Funkce BPS)
- Zajištění vyvažování článků při nabíjení (pasivní balancér)
- Univerzálnost – nezávislost na chemii baterie (nominálním napětí článků)
- Možnost měnit počet článků ve stanoveném rozsahu
- Plně digitální rozhraní a propojitelnost s MCU po sběrnici
- Možnost přímo napájet MCU z BMS

3.1.3 Požadavky na design

Zdrojový subsystém bude navržen univerzálně pro všechny MR, které využívají 24V rozvodnou síť. Systém bude navržen tak, aby vydržel trvalé zatížení alespoň 30A a bude rovněž vybaven tepelnou ochranou, která bude měřit a vyhodnocovat teplotu výkonových MOS-FETů na PCB a v případě přehřátí systém odpojí od baterie.

4 Technické řešení zdrojového subsystému

4.1 Postup řešení

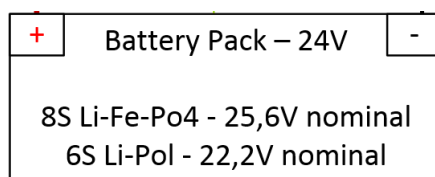
Z výše uvedeného požadavkového listu je zřejmé, že se bude jednat o relativně rozsáhlý a komplexní systém, složený z mnoha komponent. Z tohoto důvodu byl postup řešení rozdělen na následující dílčí kroky, které budou detailně popsány níže.

- 1) Volba integrovaného řešení BMS
- 2) Návrh el. schématu BMS
- 3) Návrh testovacího plošného spoje BMS
- 4) Testování funkcí BMS v laboratorních podmínkách
- 5) Propojení a konfigurace BMS pomocí SW výrobce
- 6) Propojení BMS s Mikro-kontrolérem
- 7) Programování mikro-kontroléru a komunikace s BMS
- 8) Návrh el. schématu implementace BMS, MCU a všech periférií
- 9) Návrh PCB na základě schématu
- 10) Testování funkcí celého systému
- 11) Tvorba ovládací aplikace pro PC

4.2 Návrh BMS

4.2.1 Volba kompatibilních baterií

V mobilní robotice se očekává nejčastější využití baterie Li-Fe-Po4 s nominálním napětím 3,2V na článek, nebo baterie Li-Pol s 3,7V na článek. Každá z těchto baterií má své výhody a nevýhody popsány výše (viz. kap. 2.1). Pro zachování univerzálnosti systému musí být BMS schopen pracovat s oběma typy, které se navíc budou lišit počtem článků, aby bylo zachováno provozní napětí blízké 24V.



Obr. 4 – Typy baterie

Budou tedy uvažovány tyto dvě nejčastější varianty:

1) 8S Li-Fe-Po4 (osmi-článeková baterie)

Provozní napěťový rozsah baterie se určí ze vztahů:

$$V_{\min(\text{LFP})} = (V_{\text{UVP}(\text{LFP})} \cdot S) = (2,75 \cdot 8) = 22V$$

$$V_{\max(\text{LFP})} = (V_{\text{OVP}(\text{LFP})} \cdot S) = (3,7 \cdot 8) = 29,6V$$

2) 6S Li-Pol (šesti-článeková baterie)

Provozní napěťový rozsah baterie se určí ze vztahů:

$$V_{\min(\text{Li-Pol})} = (V_{\text{UVP}(\text{Li-Pol})} \cdot S) = (3 \cdot 6) = 18V$$

$$V_{\max(\text{Li-Pol})} = (V_{\text{OVP}(\text{Li-Pol})} \cdot S) = (4,2 \cdot 6) = 25,2V$$

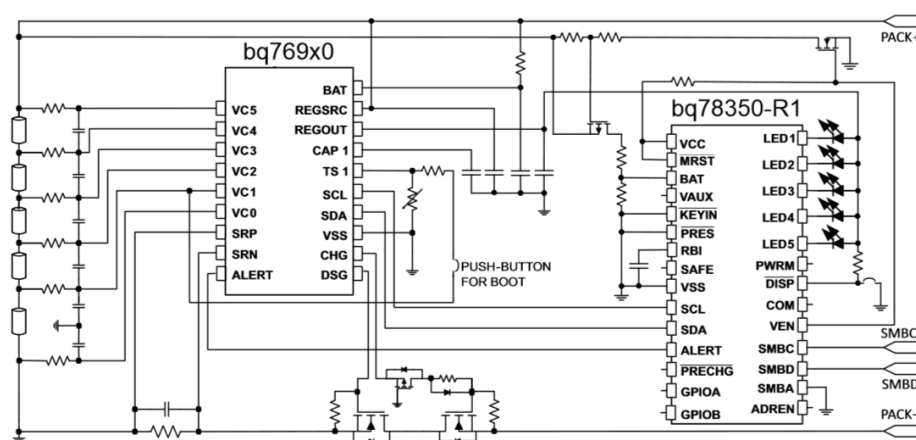
Kde hodnoty V_{UVP} a V_{OVP} jsou maximální a minimální provozní napětí na článek, a S je počet článků v packu. Tyto hodnoty se mohou u různých výrobců baterií lišit, proto musí být BMS univerzální, s možností změny těchto prahových hodnot.

4.2.2 Volba integrovaných obvodů

Na základě průzkumu nabídek výrobců IO pro účely ochrany a monitoringu baterií bylo zvoleno řešení od firmy Texas Instruments.

Přestože je výrobců v této oblasti elektroniky celá řada, většina nabízených produktů nesplňuje výše stanovené požadavky. Nejčastěji není splněna podmínka univerzálnosti, resp. nezávislosti na chemii použité baterie nebo nedostatečný vybíjecí či nabíjecí proud. Řada výrobců rovněž nabízí řešení, která nejsou příliš vhodná pro MR, protože nedokáží odbavit dostatečné množství článků baterie pro sestavení 24V packu, případně nejsou schopna kontrolovat jednotlivé články jednotlivě a vyžadují k tomu další elektroniku viz. [2].

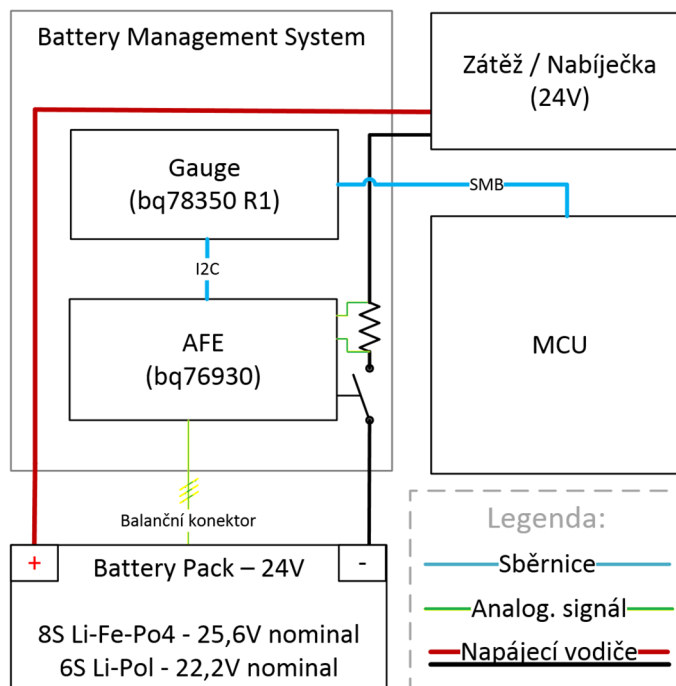
Po uvážení a kontrole všech parametrů bylo zvoleno konkrétní řešení BMS [3], složené z dvojice IO **bq769x0** a **bq78350**. Tyto obvody byly zvoleny nejen proto, že jejich kombinace disponuje všemi výše požadovanými parametry, ale také na základě předchozí zkušenosti s obvody pro power-management od Texas Instruments (viz. 2.3 – *Návrh BPS*).



Obr. 5 – Využití zvolených IO – zjednodušené schéma

4.2.3 Blokové schéma a popis funkce

Následně bylo navrženo blokové schéma BMS včetně jeho připojení k MCU. Na Obr. 6 je znázorněno vzájemné propojení jednotlivých komponent.



Obr. 6 – Blokové schéma BMS

Jak již bylo zmíněno výše, BMS je složen z dvojice IO propojených sběrnicí I2C. Hlavní funkcí **AFE** je měřit elektrické veličiny na baterii, porovnávat je s nastavenými prahovými hodnotami a tím zajistit ochranu baterie. Tento IO má přístup ke všem článkům pomocí balančního konektoru. Současně pomocí měřicího rezistoru (bočníku) snímá proud, který teče z nebo do baterie. V případě, že jsou překročeny prahové hodnoty, AFE přímo řídí vstupní i výstupní MOS-FETy, takže je schopen ihned baterii odpojit. Tím je zajištěna bezpečnost baterie na HW úrovni.

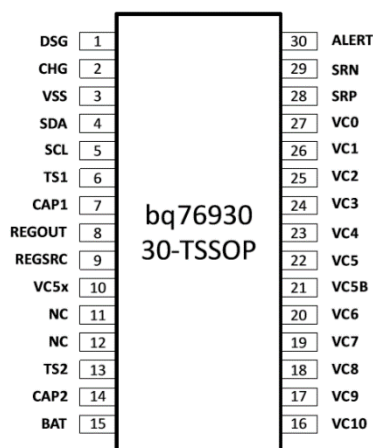
Další funkcí AFE je odesílat v případě dotazu měřené hodnoty do nadřazeného obvodu k dalšímu zpracování.

Gauge (Gas Gauge), neboli Battery Management Controller je obvod, jehož primární funkcí je pravidelně vyčítat hodnoty z AFE, a na základě těchto hodnot pak odhadovat výdrž baterie. Dalším úkolem tohoto IO je také měřené a vypočtené hodnoty odesílat po sběrnici SMB nadřazenému systému, v tomto případě MCU. Tento obvod však hodnoty nejen vyčítá z AFE,

ale také přeposílá konfigurační příkazy z nadřazeného systému, aby bylo možné měnit prahové hodnoty ochrany nastavené v AFE.

4.2.4 AFE (Analog Front End)

Firma Texas Instruments nabízí pro toto řešení tři rozdílné IO, které se liší podle počtu článků baterie. Protože je navrhován 24V systém, množství článků se bude měnit mezi 6-8 (viz. *kap. 4.2.1*), podle nominálního napětí jednoho článku jednotlivých typů baterií. To je důležité pro zachování univerzálnosti systému. Na základě tohoto požadavku byl zvolen konkrétní AFE [4], obvod **bq76930**, který umožňuje připojit 6-10ti článkovou baterii.



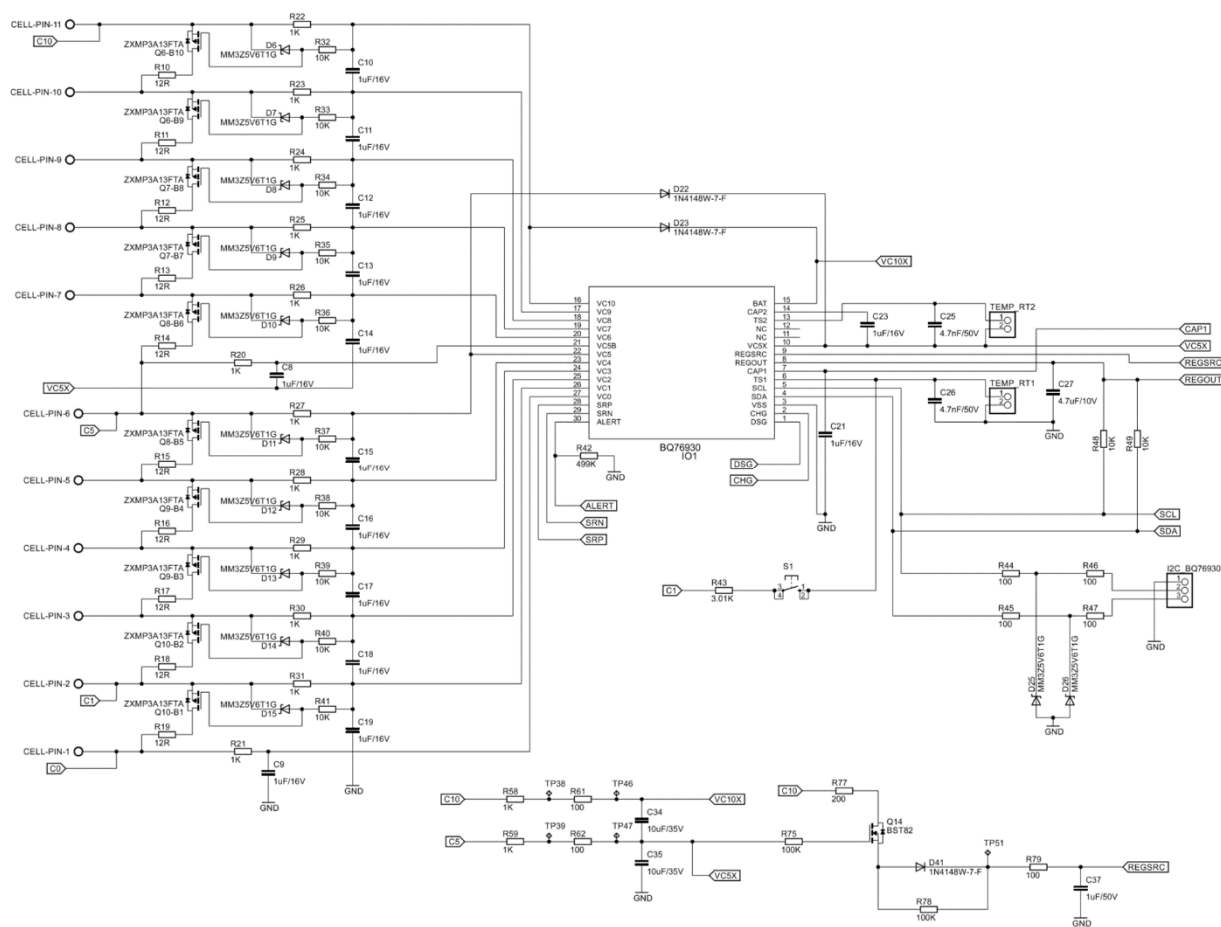
Obr. 7 – AFE – Chip pinout

4.2.4.1 Parametry AFE

- Čistě digitální výstupy
- Integrované 14bit ADC pro přesné měření proudu a napětí a teploty
- Přímá kompatibilita s termistorem 10k NTC
- HW ochrany proti přebití, podbití, zkratu i přehřátí
- I2C sběrnice pro interpretaci měření a konfiguraci
- Integrované balanční tranzistory (do proudu 50mA)
- Kompatibilita s Li-Ion, Li-Pol i Li-Fe-Po4 bateriemi

4.2.4.2 Schéma zapojení AFE – logická část

Následně bylo podle katalogu výrobce navrženo elektrické schéma zapojení. Schéma vychází ze zapojení EVM [5], ze kterého byly odstraněny přebytné testovací periferie.

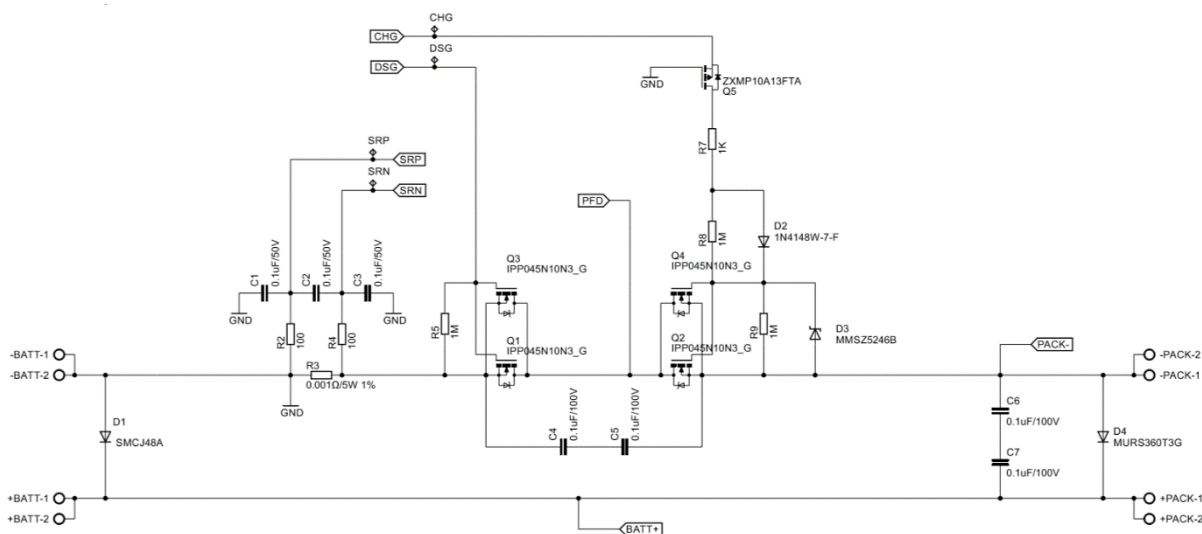


Obr. 8 – AFE - Schéma zapojení 1/2

Terminály CELL-PIN 1-11 slouží k připojení balančního konektoru. Talčítka SW1 (Boot SW) slouží k zapnutí systému po připojení baterie. Svorky TEMP_TR1 a TEMP_TR2 slouží k připojení teplotních sensorů 10k NTC. Sběrnice I2C je dále vedena do Gas Gauge, ale pro potřeby diagnostiky je vyvedena i na piny. Schottkyho diody D25 a D26 zapojeny v závěrném směru proti zemi zajišťují ochranu této sběrnice před vyšším napětím než 5,6V. Výstup REGOUT slouží k napájení dalších IO a periférií přímo z AFE. V tomto případě bude tento výstup dále využit k napájení Gauge i MCU a dalších periférií. Tento výstup standardně dodává až 30mA na 2,5V. Výhodou je, že toto napětí je k dispozici po celou dobu připojené baterie, nezávisle na tom, jestli jsou výstupní MOS-FETy sepnuty či vypnuty. Vstup REGSRC slouží jako zdroj pro tento interní regulátor a bere napětí vždy z celé série článků. Transistor Q14 sepne tento vstup až poté, co jsou všechny články rovnoměrně připojeny.

4.2.4.3 Schéma zapojení AFE – Výkonová část

Výkonovou část BMS, která je spínána z AFE tvoří MOS-FETy Q1-Q4 s tím, že dvojice Q1 a Q3 slouží pro spínání při vybíjení (DSG) a dvojice Q2 a Q4 při nabíjení (CHG). Na schématu na Obr. 9 je vidět, že (+) baterie je vedeno přímo na výstupní (+) a veškeré spínání a měření proudu je realizováno pomocí záporného vodiče (-). Stejně jako u BPS popsaného výše, terminály BATT standardně značí místo pro připojení baterie a terminály PACK vstup/výstup nabíječky nebo napájených systémů. Toto značení používá Texas Instruments u všech svých obvodů tohoto druhu.



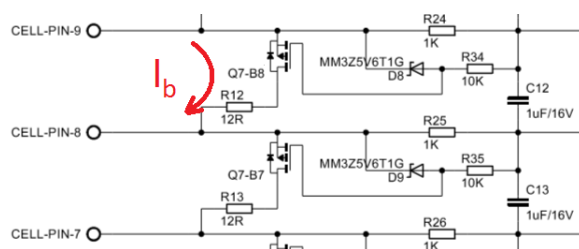
Obr. 9 – AFE - Schéma zapojení 2/2

Vodiče SRP a SRN snímají napětí na rezistoru R3, který slouží k měření proudu. Toto napětí je uvnitř AFE přivedeno na ADC a na základě přepočtu dle Ohmova zákona je vypočten proud. Kondenzátory C1-C3 společně s rezistory R2 a R4 slouží jako filtrace tohoto napětí. Diody D1 a D4 mají eliminovat případné špičky záporného napětí, způsobené např. odpojením indukční zátěže.

4.2.4.4 Schéma zapojení AFE – Balancér

V případě velkých bateriových packů, především pak modelářských Li-Pol dochází často k nevyváženosti článků vlivem teploty. Články blíže ke středu packu nemají jak odvádět teplo, a tak se napětíově vychylují vzhledem k ostatním. Aby byla zachována univerzálnost systému, bylo rozhodnuto o posílení vnitřního balancéru, který je zatížitelný max. 50mA o balancér externí, viz Obr. 10.

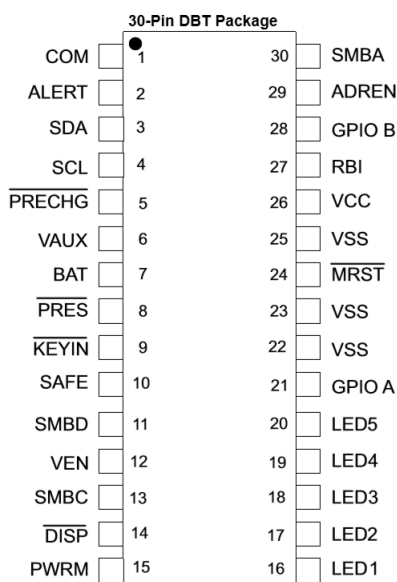
V případě, že v průběhu nabíjení AFE naměří na článku mezi CELL-PIN-9 a CELL-PIN-8 vyšší napětí než na ostatních článcích, sepne externí FET Q7-B8 a zahájí jeho vybíjení balančním proudem I_b , který je v tomto konkrétním případě omezen rezistorem R12. Dioda D8 chrání Gate transistoru Q7-B8 před případným reverzním napětím. Balancing obvykle probíhá až poté co články dosáhnou napětí 3,9V. Tento parametr je nastaven uvnitř AFE a je možno jej softwarově změnit.



Obr. 10 – Balancér - Schéma zapojení

4.2.5 Gas Gauge

Integrovaný obvod **bq78350-R1** je jedním z řešení Gas Gauge systémů od firmy Texas Instruments, které je přímo kompatibilní s výše zvoleným AFE i všemi dalšími z řady bq769x0.



Obr. 11 – Gas Gauge – Chip pinout

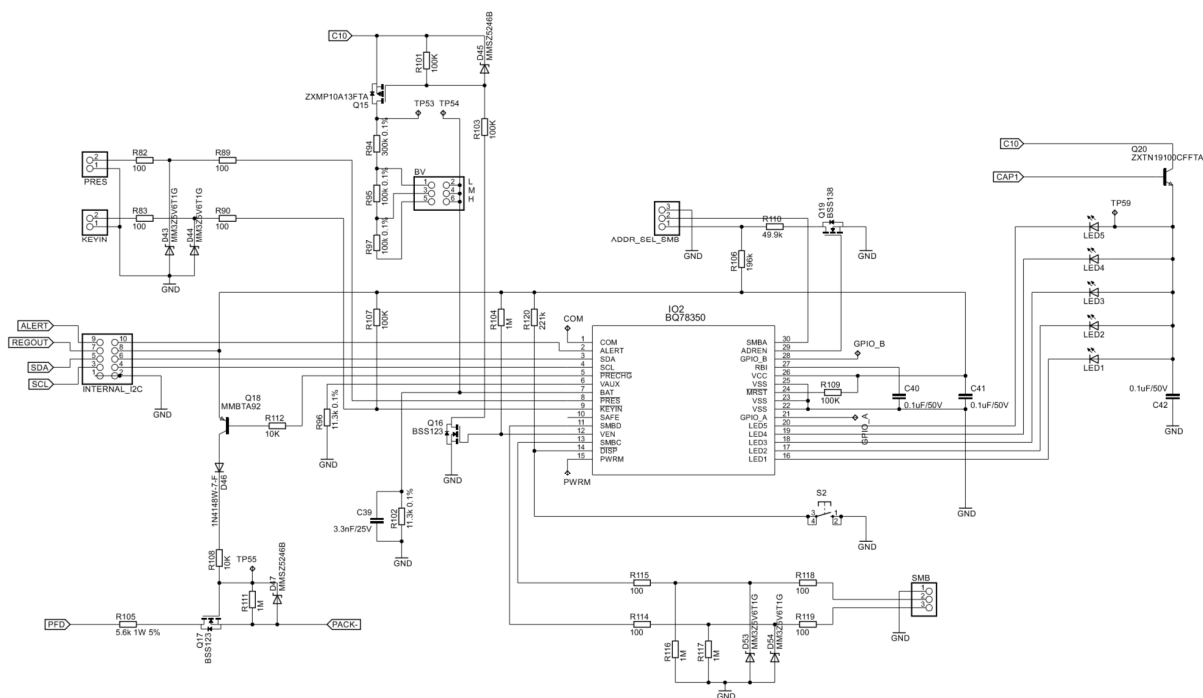
Hlavním důvodem k implementaci tohoto IO je jeho nízká spotřeba. Obvod odečítá pouze 650 μA při činnosti a 300 μA při spánku, takže jeho vliv na vybíjení baterie je zanedbatelný.

4.2.5.1 Parametry Gas Gauge

- Integrovaný algoritmus pro odhad zbývajících energie a času včetně kompenzace na konci vybíjení
- Komunikace s nadřazeným systémem pomocí sběrnice SMBus
- 9 měnitelných SMBus adres
- Podpora baterií až do kapacity 320Ah
- Max. vybíjecí a nabíjecí proud až do 320A
- Programovatelné ochranné funkce (ve spojení s výše uvedeným AFE)
- 5ti-segmentový LED indikátor zbývajících kapacity
- Odhad opotřebení baterie na základě logovaných dat
- Podpora nabíjení konstantním proudem (CC) i konst. Napětím (CV)

4.2.5.2 Schéma zapojení Gas Gauge

I toto schéma zapojení vychází z katalogového listu výrobce [3]. IO je napájen z AFE pomocí vodiče REGOUT. Pin s označením ALERT, který je v případě problému uzemněn ze strany AFE dává IO informaci, že byla nebo brzy bude dosažena nějaká prahová hodnota.

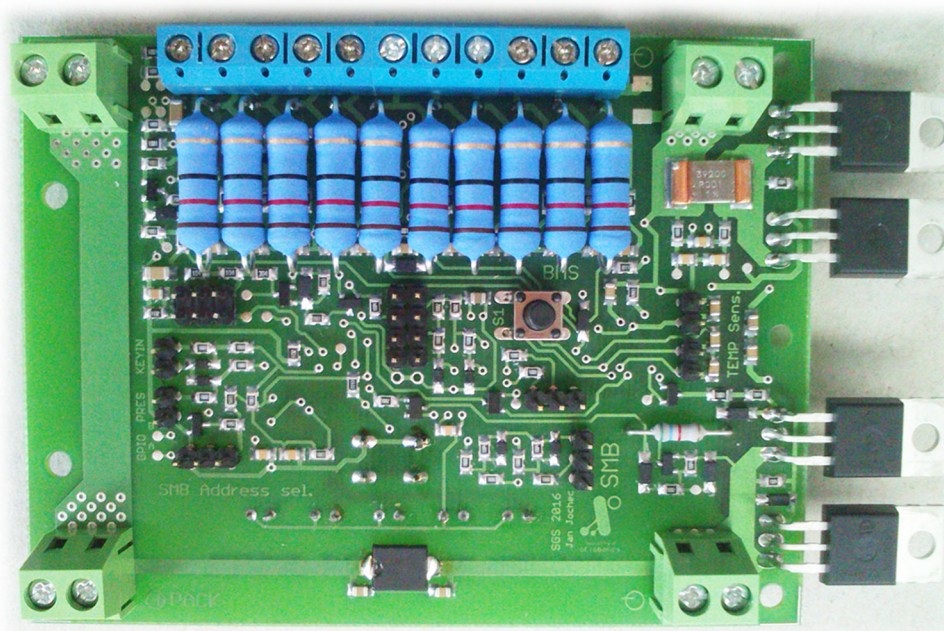


Obr. 12 – Gas Gauge – el. schéma zapojení

Vstupní terminály PRES a KEYIN slouží k informování IO o tom, jestli se nachází v režimu testování, a nemá tedy logovat data o baterii, nebo jestli se již nachází v ostrém provozu na baterii. Terminálem ADDR_SEL_SMB je možno na úrovni HW zvolit jednu ze dvou možných adres 0x16 a 0x17. Dalších sedm adres je pak možno nastavit softwarově. Schottkyho diody D53 a D54 slouží jako přepětěová ochrana sběrnice SMBus. Terminál BV (Battery Voltage) slouží k přesnému nastavení děliče pro snímání napětí. Tato funkce bude v dalších konstrukcích odstraněna, protože není nezbytná k provozu a obsahuje zbytečně drahé (přesné) součástky. Celkové napětí lze totiž určit i jako součet napětí jednotlivých článků.

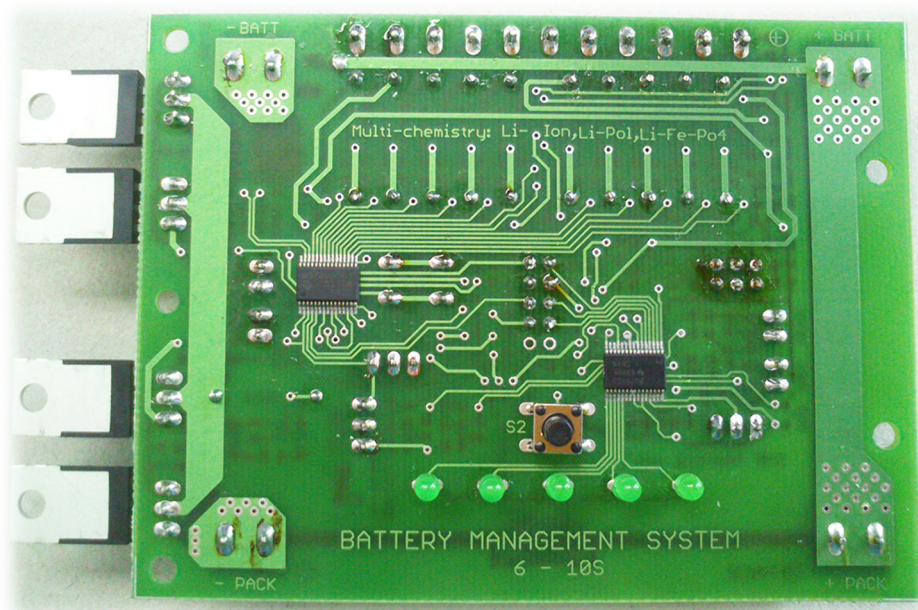
4.3 Testování a konfigurace BMS

Na základě výše uvedených schémat byla následně navržena PCB deska pro účely testování funkcí BMS, a jeho případné nasazení. Schéma i kompletní PCB design byl proveden v SW Eagle 7.1, a je zkompleťován jako příloha [1], včetně katalogových listů použitých součástek. Navržený plošný spoj byl následně vyroben a osazen.



Obr. 13 – BMS – Vyrobený PCB 1/2

Jedná se o oboustranně osazenou desku plošných spojů. Při jejím návrhu byl kladen důraz na využití převážně SMD součástek tak, aby byl plošný spoj co nejmenší a z jedné strany osazený pouze nízkými součástkami. To z důvodu, aby mohl být plošný spoj připevněn na nějaký panel a stiskem tlačítka mohl být využit LED indikátor procent nabití baterie na Obr. 14.



Obr. 14 – BMS – Vyrobený PCB 2/2

4.3.1 Zapojení a oživení BMS

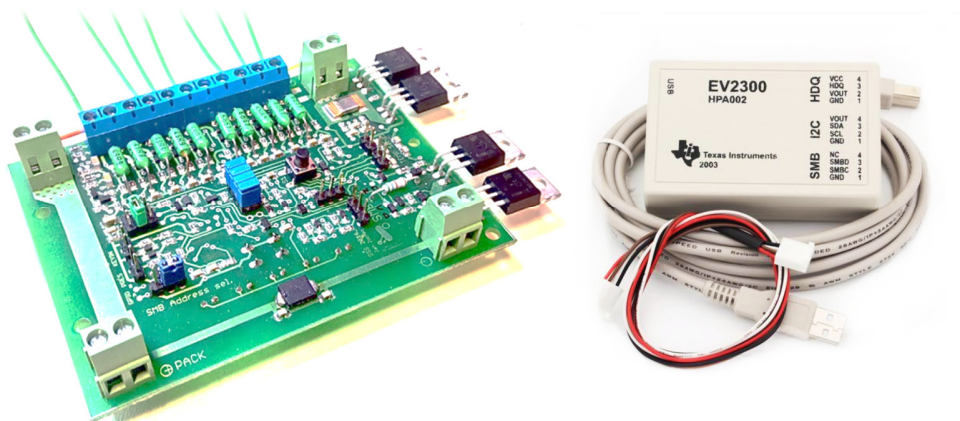
Aby nedošlo k poškození baterie nebo HW, byl BMS nejprve připojen k laboratornímu zdroji, a jednotlivé články byly simulovány sérií rezistorů o stejné hodnotě. Pro první testy byla simulována baterie 6S Li-Pol. Aby byl BMS správně zapojen k baterii, je nutno využít následující tabulky, někdy označované také jako AFE CELL MAP.

Table 8-2. Cell Connections for bq76930

Cell Input	6 Cells	7 Cells	8 Cells	9 Cells	10 Cells
VC10-VC9	CELL 6	CELL 7	CELL 8	CELL 9	CELL 10
VC9-VC8	short	short	short	short	CELL 9
VC8-VC7	short	short	CELL 7	CELL 8	CELL 8
VC7-VC6	CELL 5	CELL 6	CELL 6	CELL 7	CELL 7
VC6-VC5b	CELL 4	CELL 5	CELL 5	CELL 6	CELL 6
VC5-VC4	CELL 3	CELL 4	CELL 4	CELL 5	CELL 5
VC4-VC3	short	short	short	CELL 4	CELL 4
VC3-VC2	short	CELL 3	CELL 3	CELL 3	CELL 3
VC2-VC1	CELL 2	CELL 2	CELL 2	CELL 2	CELL 2
VC1-VC0	CELL 1	CELL 1	CELL 1	CELL 1	CELL 1

Tab. 2 - AFE Cell map

Tato tabulka udává, které vstupní svorky se mají zkratovat, aby BMS resp. AFE správně detekoval počet článků a systém bylo možno spustit. Pokud je baterie zapojena chybně, se systémem se nelze spojit, protože AFE nespustí svůj vnitřní regulátor a napětí REGOUT je tedy nulové.



Obr. 15 – BMS + EV2300

Po správném zapojení byl vyrobený BMS připojen k PC prostřednictvím konfiguračního převodníku EV2300. Tento převodník dodává rovněž firma Texas Instruments k většině svých vývojových modulů. Jedná se o převodník z SMBus a I2C na rozhraní USB.

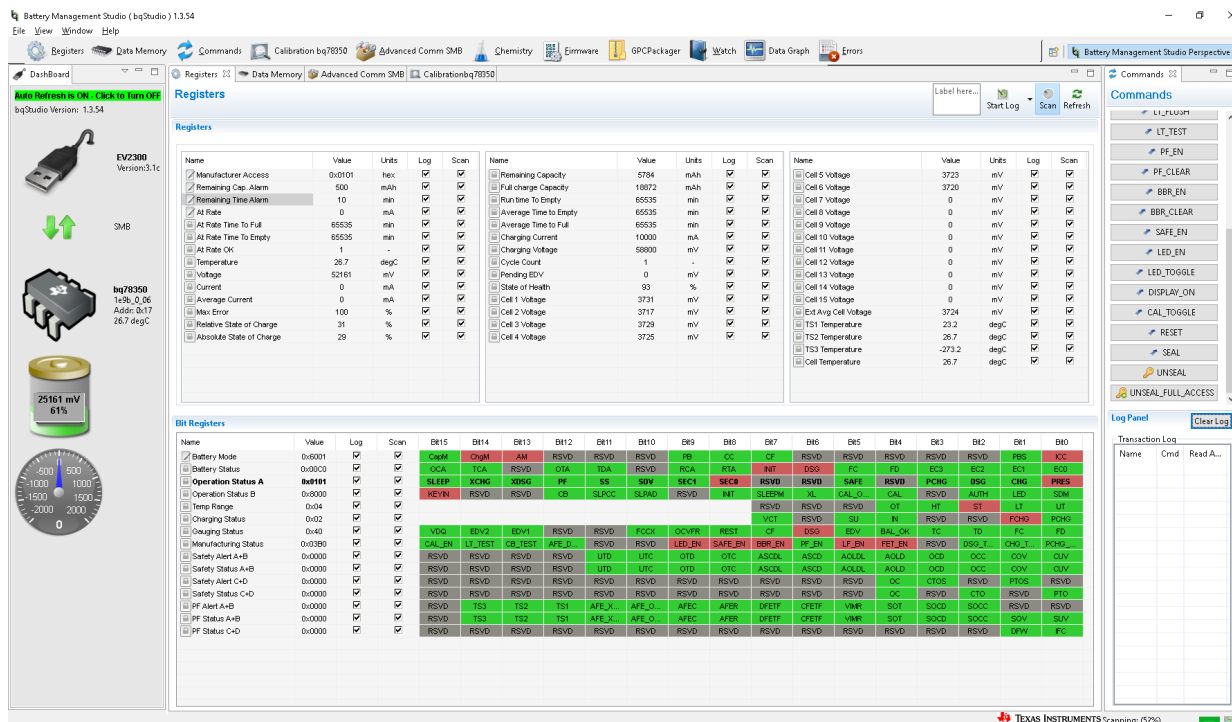
4.3.2 Konfigurace v SW Battery Management Studio

Software Battery Management Studio (BQ Studio) je konfigurační aplikace pro PC, která je volně ke stažení na stránkách Texas Instruments a je také přiložena v příloze [5]. Tato aplikace ale pro svou činnost vyžaduje originální převodník, např. EV2300 zmíněný výše. SW nabízí širokou škálu konfigurace BMS, snadné nastavení prahových hodnot, kalibraci, měření atd. bez znalosti konkrétních čísel registrů. Vše je graficky znázorněno.

Battery Management Studio rovněž umožňuje přímo měnit hodnoty v jednotlivých registrech, a nabízí tak možnost zcela kontrolovat BMS. Toto je však doporučeno testovat pouze v laboratorních podmínkách, kde nehrozí zničení baterie.

Po připojení převodníku a zapnutí BMS tlačítkem BOOT SW je při spouštění Battery Management Studia automaticky provedena detekce připojených zařízení. Pokud je vše správně zapojeno, měl by být BMS, resp. Gas Gauge automaticky detekován. Pokud ne, je možno jej vybrat ze seznamu ručně.

Následně je zobrazena základní obrazovka SW s tabulkou všech registrů ve středu, indikátorem připojení v levé a oknem s příkazy v pravé části obrazovky.



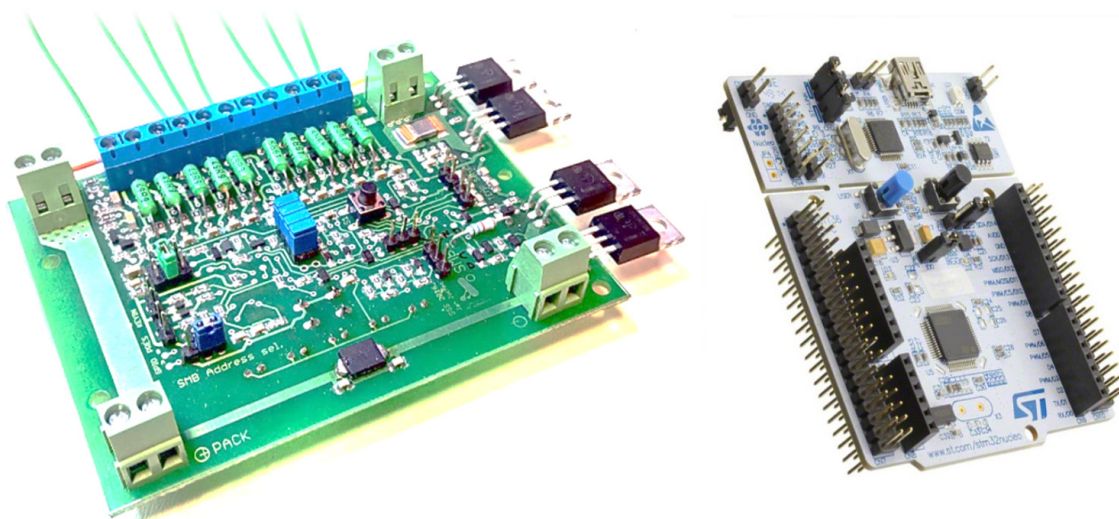
Obr. 16 – Battery Management Studio

Aby měřené hodnoty odpovídaly realitě, je nutné systém ještě kalibrovat. Jako etalon byl využit běžný multimetr.

Obr. 17 – Battery Management Studio – kalibrace

4.3.3 Propojení BMS s testovacím MCU modulem

Po otestování všech funkcí pomocí originálního SW výrobce bylo potřeba propojit BMS s nadřazeným MCU a otestovat vzájemnou komunikaci. Jako MCU byl pro tento test zvolen kit STM32L476 Nucleo od firmy ST Microelectronics. Tento kit byl vybrán z důvodu plánované implementace některého z MCU tohoto výrobce. Výhodou je možnost využití HAL knihoven (High Abstract Layer) které jsou v rámci této platformy snadno přenositelné. Součástí těchto knihoven je rovněž HW podpora pro sběrnici SMBus, což zjednodušuje propojení těchto dvou testovaných komponent.



Obr. 18 – BMS + STM32 Nucleo kit

Ke správnému nastavení kitu byl využit konfigurační generátor zdrojového kódu STM32 Cube MX. Jedná se o SW, ve kterém je možno snadno nakonfigurovat libovolný mikrokontrolér firmy ST Microelectronics. Vygenerovaný zdrojový kód byl následně editován v SW Keil, kde byl naspán hlavní algoritmus zdrojového kódu v jazyce C. Tyto kroky budou v této práci dále rozvedeny. (viz. *kap. 4.4.2 a 4.6.2*)

4.4 Návrh zdrojového subsystému

Po otestování všech využitelných funkcionalit, které BMS nabízí a jeho propojení s vývojovým kitem byla část testování služeb BMS prohlášena za kompletní. Následně bylo přistoupeno návrhu komplexního zdrojového subsystému, včetně všech komponent a periférií. Při návrhu bude kladen důraz na dostatek napájecích i komunikačních periférií, aby tento systém mohl být snadno nasazen v libovolném mobilním robotu s 24V napájecí sítí. K tomu se pojí další stanovené požadavky nad rámec požadavkového listu, které mají činit modul univerzálnějším a tedy i využitelnějším v mobilní robotice.

Do systému budou dále implementovány tyto periferie:

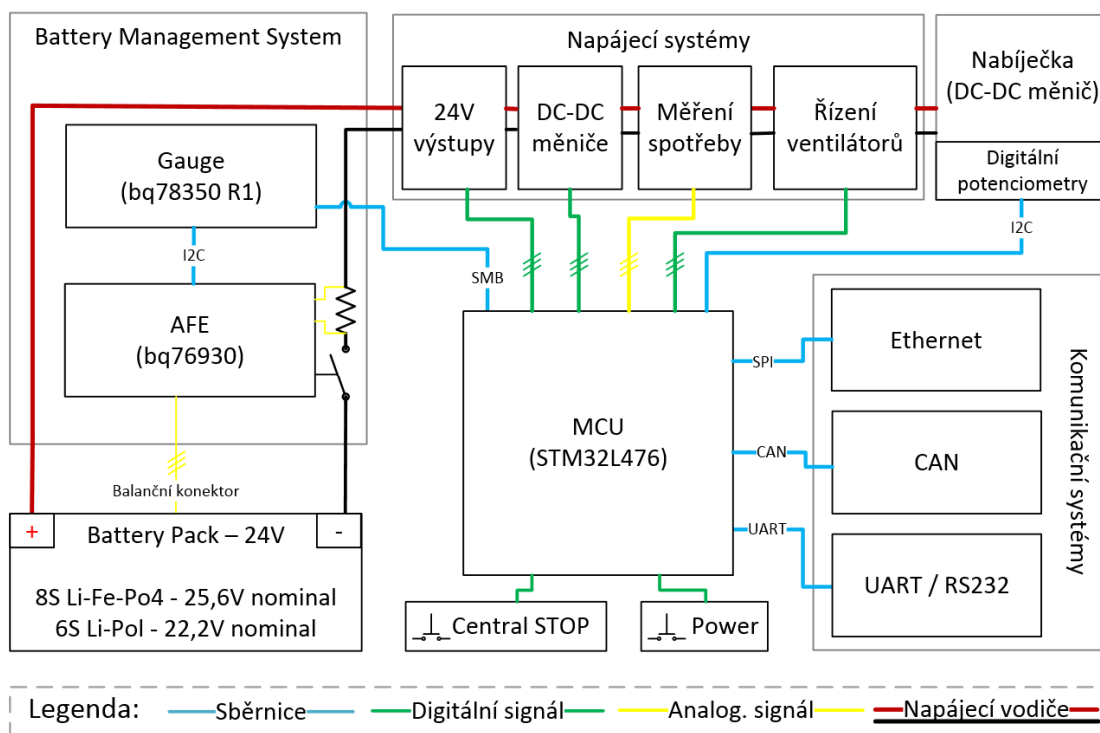
- Nabíjecí modul
- Ethernet modul
- CAN sběrnice
- Sběrnice UART/ RS232
- Hallovy sondy pro měření proudu ve všech napájecích větvích
- Vývody pro tlačítko Central STOP
- Systémy pro řízení dvou ventilátorů

Některé tyto systémy budou implementovány nad rámec zadání práce, a mají zvýšit množství funkcí tohoto napájecího subsystému a rozšířit tak možnosti jeho nasazení ve více mobilních robotech na katedře.

Konkrétním robotem pro nasazení tohoto napájecího subsystému, zvoleným dle zadání, bude rover K3P4 pro soutěž European Rover Challenge. Jedná se o robot s 24V napájecí sítí, ve kterém bude jako řídicí systém využito Arduino. Pro komunikaci s tímto nadřazeným systémem bude tedy využita sériová linka UART. Pro napájení Arduina a senzorů bude využita 5V napájecí větev a pro komunikační subsystém bude potřeba napětí 12V při proudu alespoň 2A. Tento robot je aktuálně ještě ve vývoji a zástavbové rozměry pro baterii a zdrojovou desku ještě nejsou známy.

4.4.1 Blokové schéma

Nejprve bylo vytvořeno blokové schéma, implementující všechny komponenty. Těmi jsou: MCU, BMS, napájecí systémy, nabíječka, komunikační systémy a systémy pro vnější kontrolu modulu (Tlačítko Central STOP a tlačítko POWER pro zapnutí/vypnutí). Všechny tyto komponenty jsou napojeny na MCU.



Obr. 19 – Blokové schéma celého systému

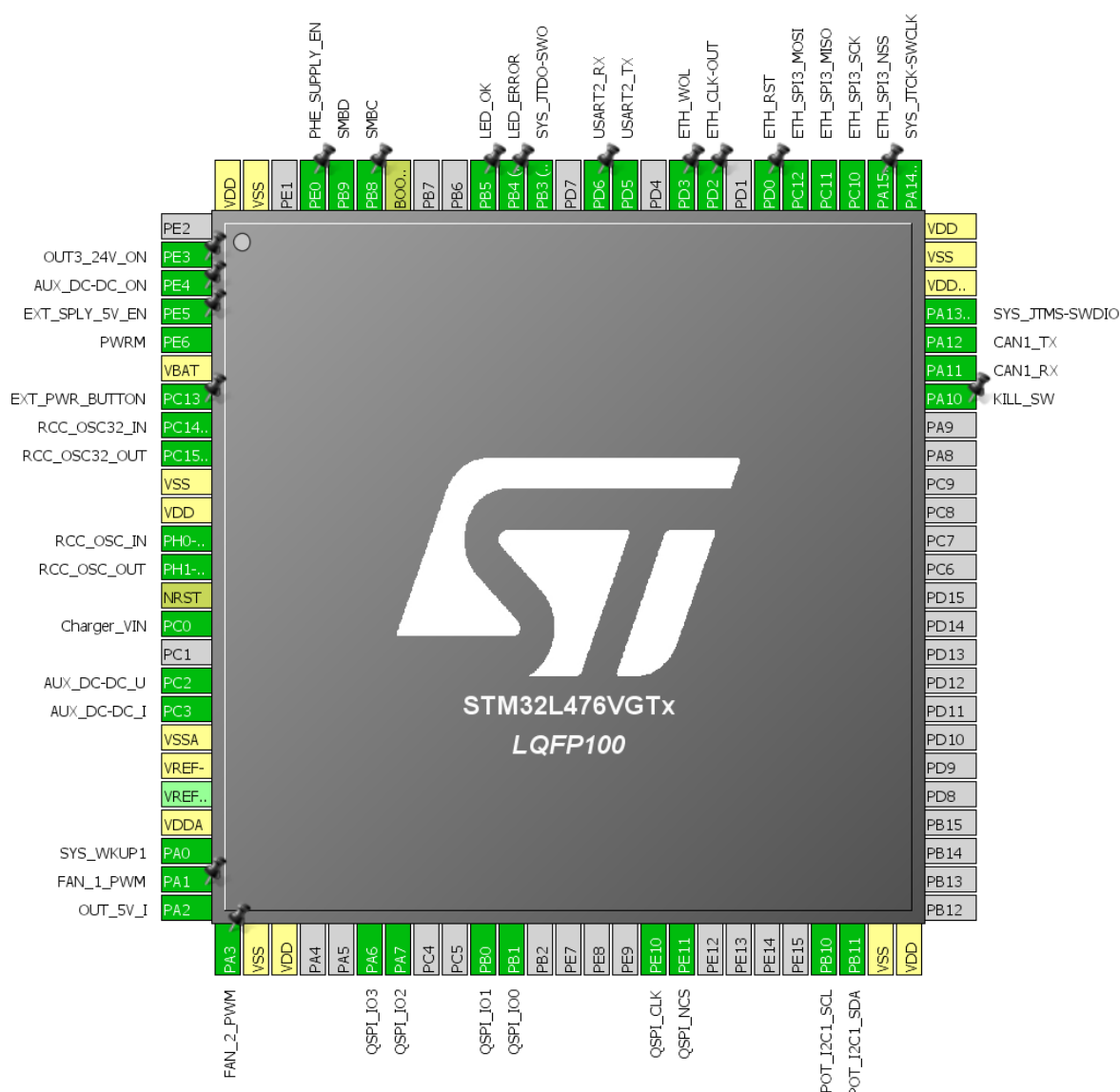
Na blokovém schématu nejsou záměrně znázorněny napájecí vodiče jednotlivých periférií, protože jak se později ukázalo, samotné napájení jakýchkoli vnitřních obvodů zdrojového modulu přináší svá specifická úskalí. Tato problematika bude podrobněji rozvedena u jednotlivých částí el. schématu. Blokové schéma bylo vytvořeno v SW Microsoft Visio 2016.

4.4.2 Volba, konfigurace a implementace MCU

Dalším krokem návrhu je výběr vhodného mikro-kontroléru. Vzhledem k dříve využitému kitu od ST Microelectronics a možnosti využití přenositelných HAL knihoven na platformě STM32 byl zvolen konkrétní chip **STM32L476VGT**. Tento MCU je postaven na výpočetním jádře ARM Cortex-M4 a jeho hlavní předností je velmi nízká spotřeba energie [6]. Tato varianta se nachází v pouzdře LQFP100 a nabízí 82 vstupně výstupních pinů. MCU dále

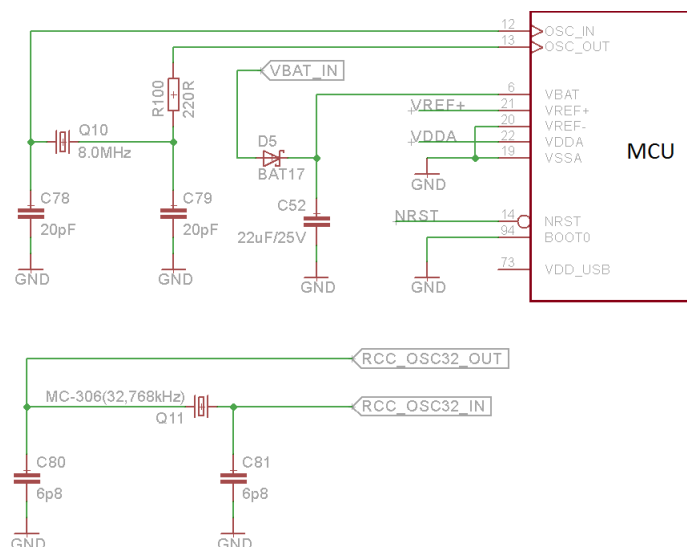
nabízí řadu implementovaných sběrnic včetně SMBus a UART, které jsou pro realizaci nezbytně nutné.

Aby mohlo být navrženo schéma a deska plošných spojů, je potřeba nejprve určit, na který pin MCU bude připojen který systém, jestli se jedná o vstup či výstup, analogový signál či sběrnici atd. Pokud bychom všechny tyto konfigurační operace prováděli přímo v kódu, byl by to velmi zdlouhavý a nepochybně i značně chybový proces. Ke zjednodušení práce s konfigurací svých chipů vyvinula firma ST Microelectronics specializovaný SW STM32 Cube. Na Obr. 20 je vidět již nakonfigurované zapojení MCU. Jeho piny jsou pojmenovány podle funkcí, které budou vykonávat. Výhodou takto pojmenovaných pinů je také to, že pod stejnými názvy se k nim bude přistupovat i v kódu.



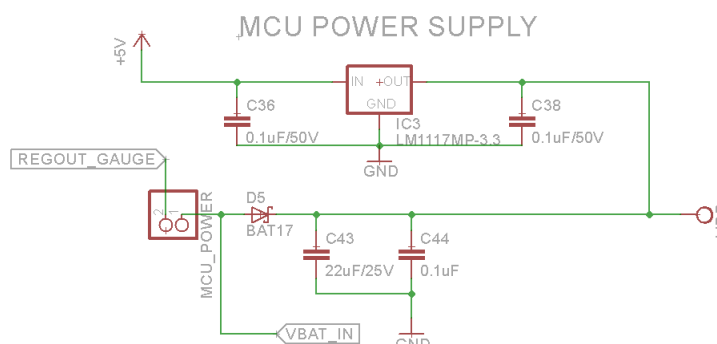
Obr. 20 – STM32 CUBE – Konfigurace chipu

Následně bylo navrženo elektrické schéma v SW Eagle, do kterého byly postupně implementovány všechny výše popsané komponenty. Nejprve byl implementován mikrokontrolér se všemi okolními součástkami, které jsou v tomto zapojení nutné k jeho funkci. Jedná se v první řadě o krystal Q10 o frekvenci 8Mhz, který slouží jako externí zdroj hodinového signálu pro vnitřní potřeby MCU a krystal Q11 o frekvenci 32,768kHz, který poskytuje hodinový signál pro modul reálného času RTC. Tento modul je implementován přímo v MCU a nevyžaduje žádné další externí součástky.



Obr. 21 – Schéma zapojení MCU – Krystaly

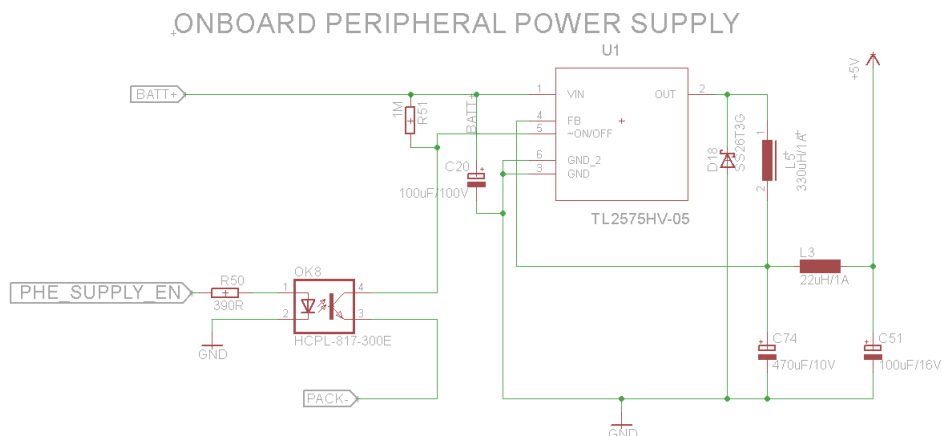
Další podpůrnou součástkou je dioda D16, která přivádí napětí 2,5V z BMS na pin VBAT mikro-kontroléru. Tento pin slouží k napájení výše uvedeného RTC modulu a zajišťuje, aby hodiny tohoto modulu běžely i tehdy, kdy je zbytek MCU vypnutý nebo uspaný.



Obr. 22 – Schéma zapojení MCU – Napájení 1/3

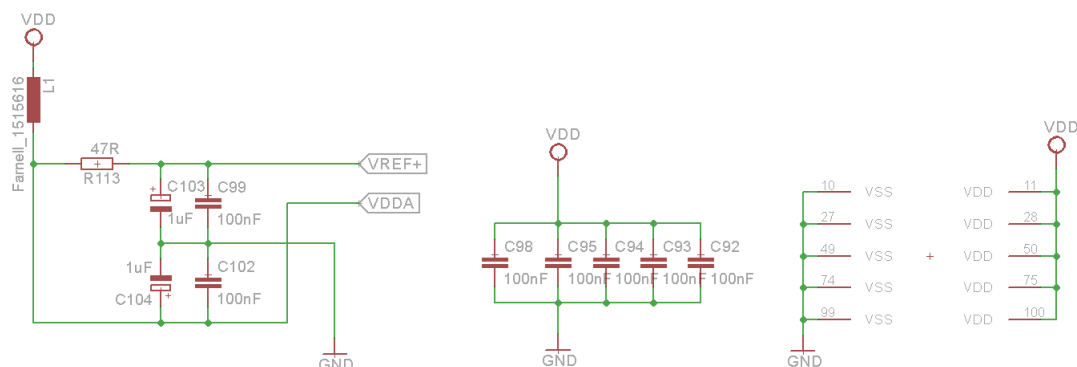
Mezi další podpůrné obvody patří obvod ke sloučení napěťových zdrojů pro MCU na obr. 22. Tento obvod přivádí jak napájení z pevného regulátoru s nízkým úbytkem (LDO) IC3 tak

současně napájení z BMS přes diodu D5 na napájecí piny MCU. Jelikož napájecí napětí z BMS je pouze 2,5V, navíc sníženo diodou D5 na 1,9V (při 10mA), a napětí z LDO je 3,3V, je mikrokontrolér primárně napájen z LDO. Pokud však má MCU snížit svou spotřebu, je pomocí pinu PHE_SUPPLY_EN vypnut 5V DC-DC měnič na Obr. 23, čímž dojde k vypnutí i LDO regulátoru, který je zařazen až za něj. V tomto případě dojde ke snížení napájecího napětí MCU na asi 1,9V, což stačí pro jeho napájení v nečinnosti. K tomuto řešení bylo přistoupeno z důvodu proudového omezení regulátoru uvnitř BMS na 30mA.



Obr. 23 – Schéma zapojení MCU – Napájení 2/3

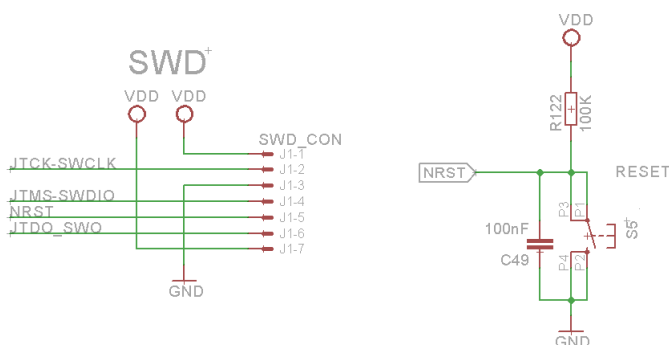
Zapojení na Obr. 23 znázorňuje 5V DC-DC měnič, který je schopen dodat až 1A pro napájení jak MCU, tak i všech periférií v rámci celého zdrojového modulu. Jedná se o standardní buck DC-DC měnič, který převádí vstupní napětí z výstupu BMS na výše zmíněných 5V, navíc vyhlazených cívkou L3 a kondenzátorem C51. Toto vyhlazení má potlačit případné rušení generované DC-DC měničem. Optočlen OK8 umožňuje zapnutí/vypnutí měniče z MCU. Protože měnič pracuje proti zemi na vstupu BMS (GND), tedy přímo na baterii (BATT-), musí být pro zachování bezpečnosti baterie tento obvod odpojitelný i z BMS. Proto nebyl výstup emitoru optočlenu uzemněn na GND, ale na výstupní odpínatelnou zem z BMS (PACK-). V případě že BMS odpojí baterii, bude i tento měnič vypnut bez ohledu na to, jestli jej má MCU zapnutý nebo vypnutý. Rezistor R51 slouží jako Pull-Up pro spínací pin měniče.



Obr. 24 – Schéma zapojení MCU – Napájení 3/3

Obvod na levé straně na Obr.24 slouží jako filtrace vstupního referenčního napětí pro MCU. Napěťová reference (VREF+) slouží pro potřeby vnitřních AD převodníků. Aby bylo možno měřit přesně a bez vnějšího rušení, které do systému vnáší např. DC-DC měniče, je nutné provést filtraci tohoto napětí. K tomu slouží tlumivka L1 spolu s kaskádou elektrolytických a keramických kondenzátorů, které dobře pohlcují rušení. Kondenzátory C92-C98 slouží k filtraci napájecího napětí v rámci MCU, a na desce jsou rozmístěny co nejblíže napájecím pinům.

Aby bylo možné mikro-kontrolér naprogramovat, je nutné vyvést někde na desku konektor SWD. Tento konektor se současně nachází na všech vývojových kitech firmy ST Microelectronics takže je možné MCU naprogramovat s použitím kitu jako programátoru.

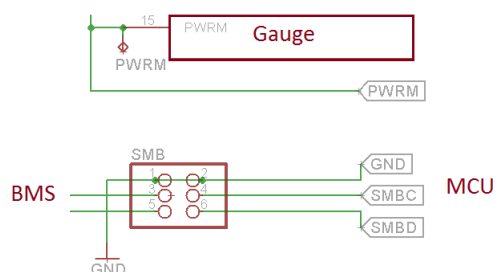


Obr. 25 – Schéma zapojení MCU – SWD a Reset

Tlačítko Reset na Obr. 25 slouží k případnému restartu MCU v době ladění programu, a je spojeno s pinem NRST konektoru SWD. To umožní provést reset jak manuálně, tak automaticky po nahrání zdrojového kódu přímo programátorem.

4.4.3 Implementace BMS

Jak bylo popsáno v kapitole 4.2, navržený a otestovaný BMS splňuje podmínky stanovené požadavkovým listem. Na základě funkčních testů bylo rozhodnuto o kompletní implementaci jeho schématu, pouze s drobnými designovými úpravami desky a součástek. Např. výkonové MOS-FETy v pouzdře TO220 nejsou příliš vyhovující pro nový design, proto byly nahrazeny SMD verzí v pouzdře TO263-3, které využívá k chlazení plošný spoj pod sebou. Další změny byly provedeny pouze v hodnotách součástek, např. balanční rezistory byly zvýšeny z 12Ω na 50Ω , protože se při testech ukázalo, že balanční proud je příliš vysoký a balanční interval tím pádem příliš krátký. To způsobovalo nepřesnost výsledného vyvážení článků.



Obr. 26 – Schéma zapojení MCU – BMS

Následně byl BMS připojen sběrnici SMBus k MCU přes trojici jumperů. Tyto jumpery mají sloužit k odpojení MCU od BMS pro potřeby konfigurace pomocí SW Battery Management Studio.

Dále bylo rozhodnuto využít také pin PWRM (Power-Mode), který je veden z BMS, resp. Gauge do MCU. Tento pin informuje MCU o energetickém stavu, ve kterém se BMS nachází. Pokud je PWRM ve stavu High, znamená to, že z baterie je odebírán proud, BMS je probuzen a provádí měření. Díky tomu MCU ví, že nemá přejít do režimu spánku, protože některý ze systémů robotu je v provozu a může po zdrojovém subsystému vyžadovat data. Pokud však proud klesne pod stanovenou prahovou hodnotu, BMS tento stav vyhodnotí jako signál k přechodu do režimu stand-by a přitáhne tento pin k zemi. Tím informuje MCU, že jsou všechny systémy vypnuty, tudíž že po něm nemá kdo vyžadovat data, protože není odebírán žádný proud. Na základě toho přejde MCU do režimu spánku a šetří energii. Tato rozhodovací prahová hodnota musí být v BMS nastavena vždy pro konkrétní robot a to v konkrétní situaci, kdy jsou všechny systémy v režimu stand-by, nebo vypnuty.

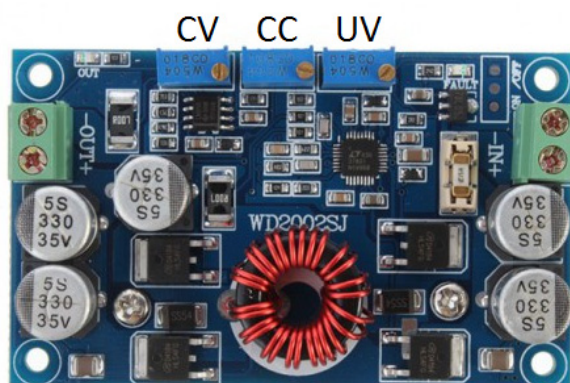
4.4.4 Nabíjecí modul

Lithiové baterie, nebo obecně baterie se standardně nabíjí dvěma způsoby. Pokud není baterie podbitá, nabíjí se rovnou konstantním proudem (CC) a jakmile vyroste napětí na baterii k nabíjecímu napětí, přejde nabíječka do režimu konstantního napětí (CV) a proud pomalu klesá k nule. V případě že je baterie podbitá, nebo hloubkově vybitá, využívá se na začátku nabíjení buď nižším konstantním proudem, nebo konstantním napětím. K tomu je však již uspůsoben BMS a využívá k tomu funkci Precharge.

Aby byla zvýšena univerzálnost celého napájecího subsystému, bylo rozhodnuto o připojení externího DC-DC měniče a jeho využití jako nabíječky. K tomuto účelu byl zvolen sériově vyráběný DC-DC měnič s obvodem LTC3780 [7] firmy Analog Devices (dříve Linear Technology). Tento měnič v konfiguraci dle Obr. 27 disponuje následujícími parametry:

- Vstupní napětí: 4 – 36V
- Výstupní napětí: 0,8 – 30V
- Max. trvalý výstupní proud: 7A
- Max. špičkový výstupní proud: 10A
- Režim CV a CC

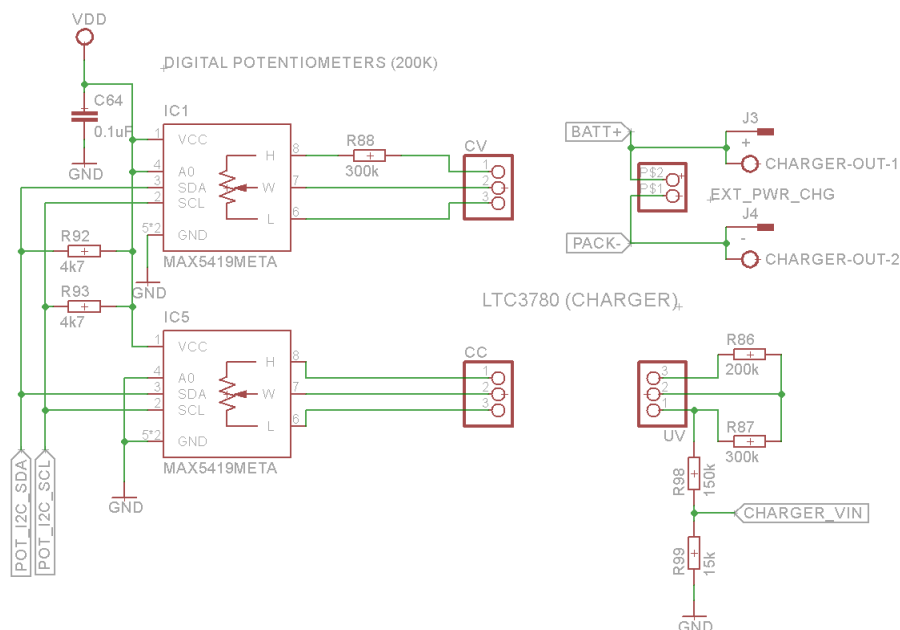
Hodnoty napětí CV (constant voltage), proudu CC (constant current) a napětí UV (under-voltage) jsou nastavitelné více-otáčkovými potenciometry (*viz. Obr. 27*). Napětíový rozsah je dostačující pro nabíjení libovolné baterie v rozmezí 6-8 sériově zapojených článků.



Obr. 27 – Nabíječka – Modul LTC3780

Měnič byl zakoupen na e-shopu dexhal.cz [8] již jako hotový modul, vybaven i chladiči a svorkovnicemi. Tato deska bude následně nasazena na hlavní desku zdrojového subsystému a její výstup bude zapojen na výstup z BMS (PACK). V budoucnu budou potenciometry

nahrazeny piny a tato deska bude propojena s digitálními potenciometry. To zajistí řízení tohoto měniče přímo z procesoru viz. schéma na Obr. 28. Potenciometr pro nastavení nejnižšího napětí baterie, při kterém bude ještě dovoleno nabíjet (UV) bude potlačen dvojicí pevných rezistorů R86 a R87. Tato funkce není potřeba, protože ji zajišťuje BMS. První pin potenciometru UV, který je spojen se vstupní svorkovnicí bude současně využit k detekci nebo i měření vstupního napětí, které do měniče přichází. Toto napětí bude měřeno MCU přes dělič složený z rezistorů R98 a R99.



Obr. 28 – Nabíječka – Schéma řízení

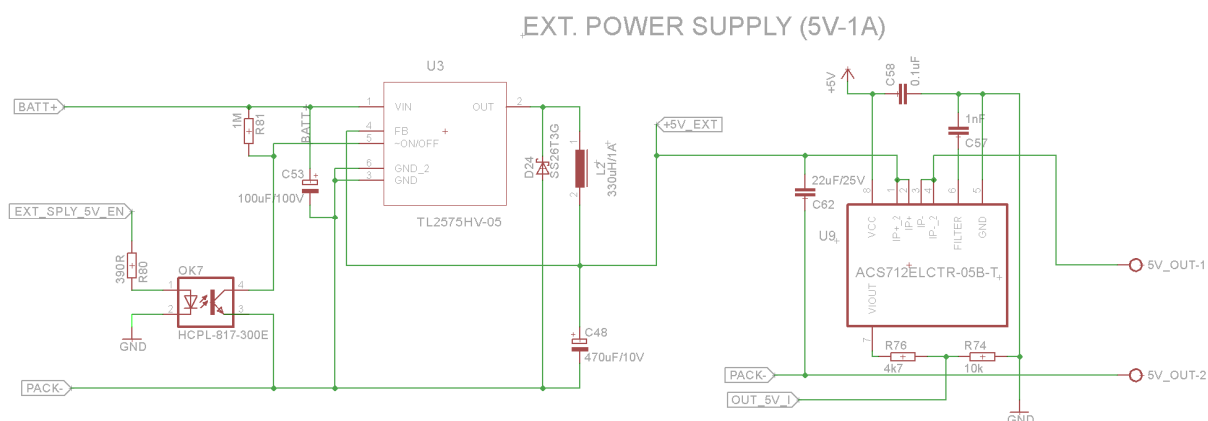
Hlavní výhodou, a současně důvodem k implementaci tohoto modulu je široký rozsah napájecího napětí. To umožní nabíjet MR z téměř libovolného adaptéru, který bude zrovna k dispozici, čímž se zvyšuje univerzálnost. Další výhodou využití tohoto modulu, místo vlastního návrhu DC-DC měniče je především úspora místa na desce zdrojového modulu, nižší cena z důvodu implementace sériově vyráběného kusu a v neposlední řadě časová úspora vývoje a vlastního návrhu.

4.4.5 Napájecí, měřicí a spínací periferie

Mezi jednu z nejdůležitějších funkcí zdrojového subsystému pro MR patří napájení pokud možno všech okolních subsystémů robotu. Protože různé subsystémy využívají často rozdílná napětí, je nutné, aby zdrojový subsystém disponoval dostatečným počtem napájecích větví o různých napětích. Nejčastěji využívaná napětí pro senzory a řídicí systémy v MR jsou

5V, 9V, 12V, a 24V. Pokud by však měli být implementovány měniče na všechna tato napětí, byla by výsledná deska nejen zbytečně velká, ale také drahá. Proto bude do systému implementována dvojice DC-DC měničů, z nich jeden bude pevně nastaven na 5V a druhý bude nastavitelný pomocí potenciometru.

V každém mobilním robotickém systému se předpokládá alespoň jedno zařízení napájeno 5V. Proto byl na desku implementován přídatný DC-DC měnič o tomto napětí, zatížitelný proudem 1A. Zapojení na obr. 29 i použité součástky přitom vychází z již jednou implementovaného DC-DC měniče, odebrána je pouze filtrační cívka a kondenzátor na výstupu, protože vůči výstupnímu napětí tohoto zdroje se nebude měřit. Dalším rozdílem je zapojení uzemnění měniče, které je přivedeno na (PACK-) aby mohl být DC-DC měnič v případě nouze vypnut BMS a nezpůsobil zničení baterie. Při běžném provozu bude měnič spínán přes optočlen z MCU. Optočlen je v tomto případě opět zařazen z důvodu oddělení obou zemí (GND a PACK-).



Obr. 29 – DC-DC měnič 5V – Schéma zapojení

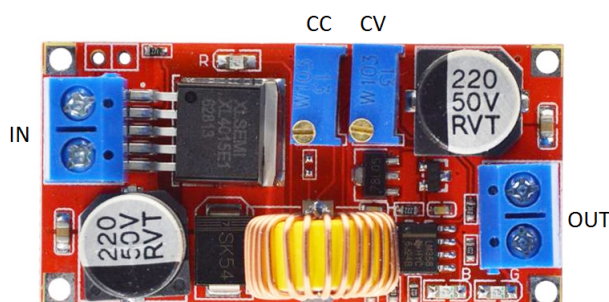
Pro plnou kontrolu nad touto napájecí větví je na výstup měniče implementována Hallova sonda U9, která snímá výstupní proud měniče, tedy spotřebu připojených subsystemů. Sonda je napájena 5V zvlášť z interního DC-DC měniče proti zemi GND, protože proti této zemi dokáže MCU přesně měřit. Pěti-voltový výstup sondy je následně napěťovým děličem snížena na 3,3V, aby mohly AD převodníky MCU využít celý měřicí rozsah sondy. Hallova sonda měří proud v rozsahu +/- 5A, avšak s nulou na výstupu v 2,5V. Kondenzátor C62 slouží k vyhlazení napětí z DC-DC měniče.

Druhá napájecí větev pro další subsystemy robotu je realizována sériově vyráběným modulem DC-DC měničem na obr. 30 postaveným na obvodu XL4015 [11].

Jedná se o Buck, tedy snižující, měnič s následujícími parametry:

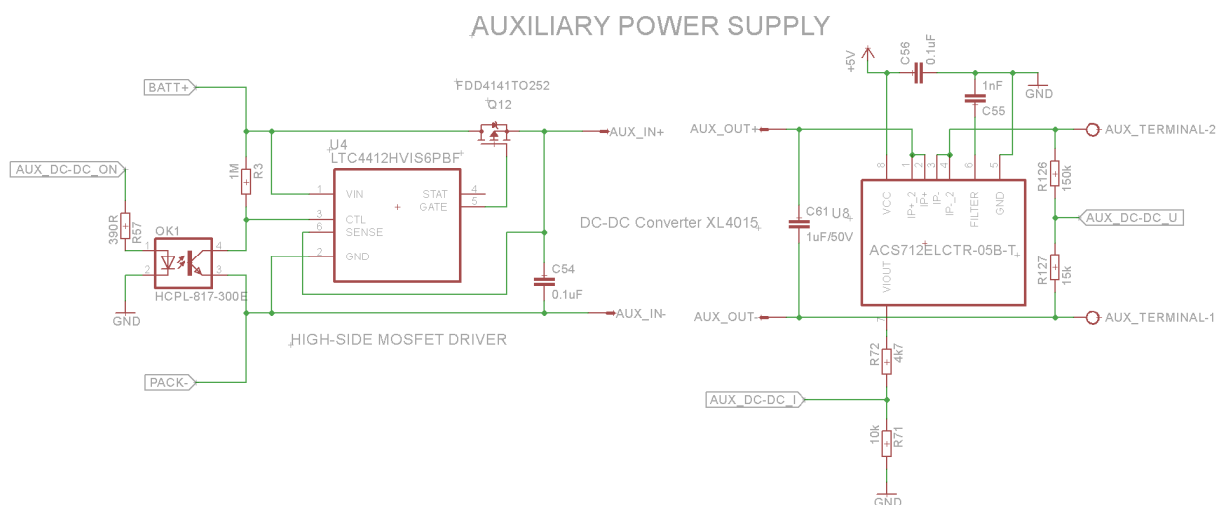
- Vstupní napětí: 4 – 38V
- Výstupní napětí: 1,25 – 36V
- Max. trvalý výstupní proud: 5A
- Režim CV a CC

Napětí i proud se nastaví dvojicí více-otáčkových potenciometrů. V případě přetížení či zkratu přejde měnič pouze do režimu CC, a nedojde k jeho zničení.



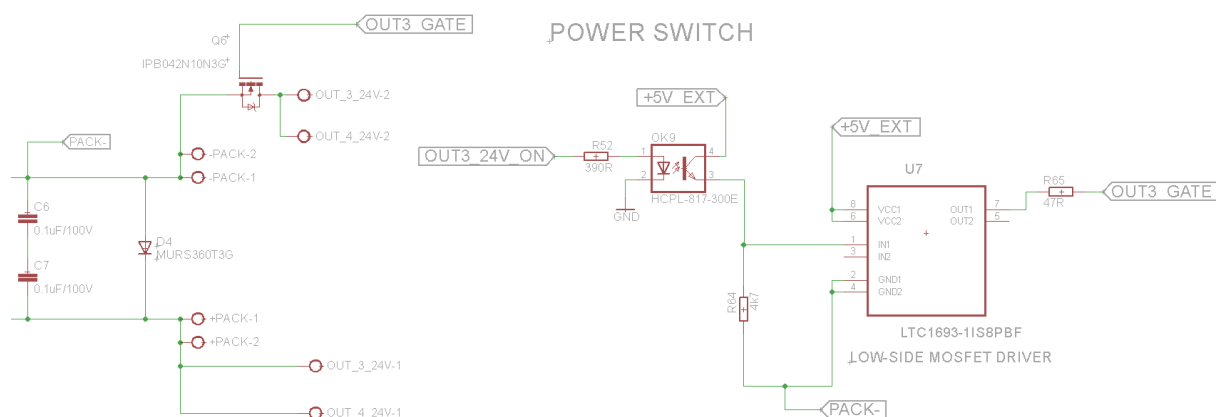
Obr. 30 – nastavitelný DC-DC měnič

Pro kontrolu nad tímto modulem slouží schéma zapojení na obr 31 níže. V levé části schématu je přívod z BMS přiveden na vstup měniče MOS-FETem Q12. Aby bylo možné tento MOS-FET spínat přímo z MCU, je před něj zařazen optočlen OK1 a MOS-FET driver U4. V pravé části tohoto schématu je opět zařazena Hallova sonda pro měření výstupního proudu z měniče. Zapojení je totožné s předchozím schématem. Protože v případě regulovatelného měniče nás zajímá také napětí, je výstupní napětí na této napájecí větvi měřeno odporovým děličem za Hallovou sondou. Dělič je realizován rezistory R126 a R127.



Obr. 31 – DC-DC měnič AUX – Schéma zapojení

Mezi další implementované obvody v kategorii napájení patří spínaný výstup AUX_3-4. Ten byl do systému zařazen, aby umožnil nadřazenému systému vypnout či zapnout určité systémy na 24V napájecí větvi. K výkonovému spínání je využit MOS-FET Q6, stejný jako v případě BMS. Protože má být ale spínán přímo z MCU, který na rozdíl od AFE neobsahuje integrovaný MOS-FET driver, byl využit externí driver U7. Spínání je opět vedeno přes optočlen, kvůli oddělení pracovních zemí. Celý obvod je totiž uzemněn na výstup z BMS (PACK-) aby byl BMS schopen i tyto obvody odpojit. Signál OUT3_24V_ON je dále přiveden na digitální výstup MCU, a slouží k zapnutí či vypnutí tohoto výstupu.



Obr. 32 – Spínaný AUX výstup – Schéma zapojení

4.4.6 Komunikační periferie

K zajištění komunikace zdrojového subsystému s nadřazeným systémem bylo vybráno k implementaci několik následujících komunikačních sběrnic, které se nejčastěji vyskytují v MR:

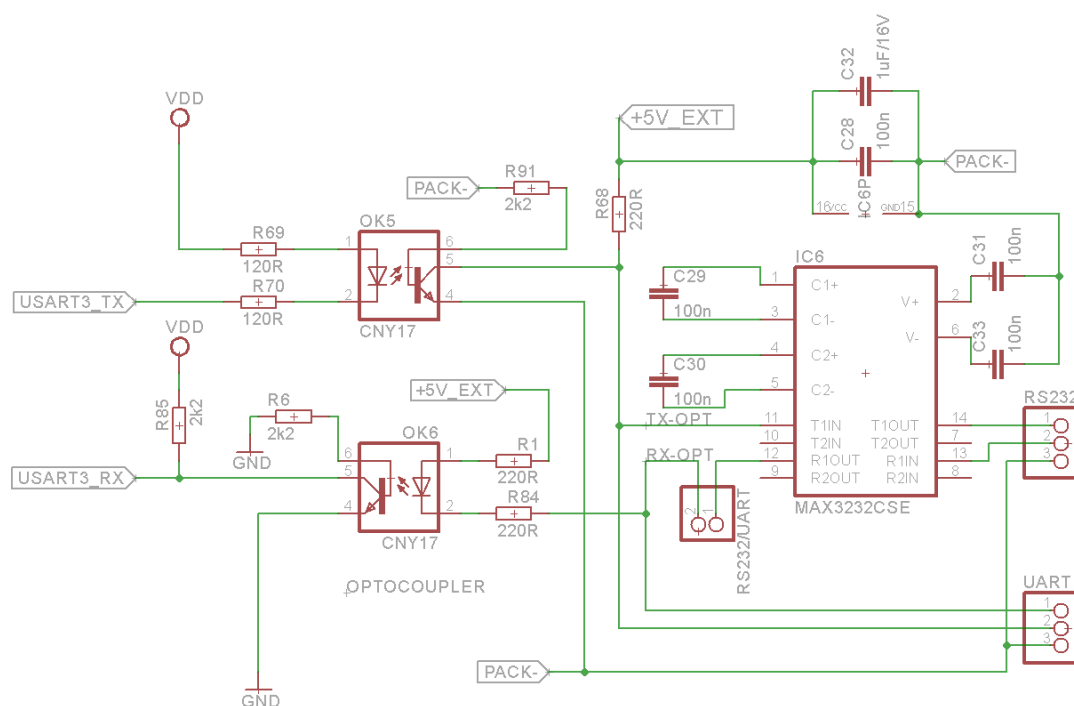
- UART (RS232)
- CAN
- Ethernet

Sběrnice jako I2C, SMBus, SPI či další sběrnice tohoto typu obvykle nejsou vhodné k delšímu vedení kabelů, protože jejich napěťové úrovně to nedovolují. Navíc těmito sběrnicemi obvykle není řídicí systém vybaven. Sběrnice UART, případně její průmyslová verze s 12V úrovní signálu RS232 byla vybrána především pro případ, že bude řídicím systémem např. Arduino, Raspberry Pi či jiný mikrokontrolér. CAN byl vybrán pro jeho robustnost a časté nasazování v řídicích jednotkách pro motory. Jelikož se jedná o paralelní sběrnici, mohl by být v robotu např. s řídicími jednotkami firmy Maxon nebo Roboteq spojen i

napájecí modul. Sběrnice Ethernet byla zvolena především pro aplikace, kde je jako řídicí systém využito PC. V tomto případě je komunikace s robotem obvykle realizována pomocí WiFi routeru, který poskytuje dostatek volných Ethernet portů.

4.4.6.1 UART (RS232)

Většina MCU bývá standardně vybavena hardwarovým UARTem a MCU z řady STM32 nejsou výjimkou. Implementace tohoto rozhraní tedy za normálních okolností není nijak obtížná. V tomto případě však situaci opět komplikuje BMS, a rozdílné zemnění. Je tedy nutné UART opto-elektricky oddělit viz obr. 33. K tomu slouží dvojice optočlenů OK5 a OK6, jeden pro oddělení RX a druhý pro TX.



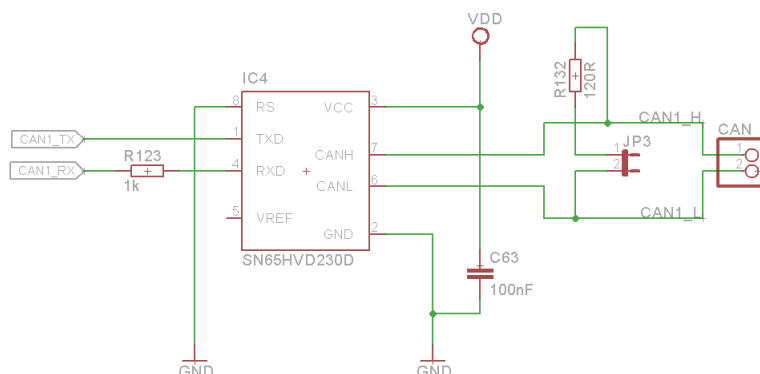
Obr. 33 – UART/RS232 – Schéma zapojení

Ke zvýšení napěťových úrovní z 5V pro UART na 12V pro RS232 slouží standardně využívaný IO MAX3232, který je napájen z 5V výstupní větve proti zemi PACK-. Na větvi RX-OPT je navíc zapojen jumper, který určuje, zda se bude používat sběrnice RS232 nebo UART.

4.4.6.2 CAN

Mikro-kontroléry řady STM32L4 mají standardně HW podporu alespoň jedné CAN sběrnice. Aby však mohl být CAN používán, je nutné za něj ještě zařadit transciever (budič).

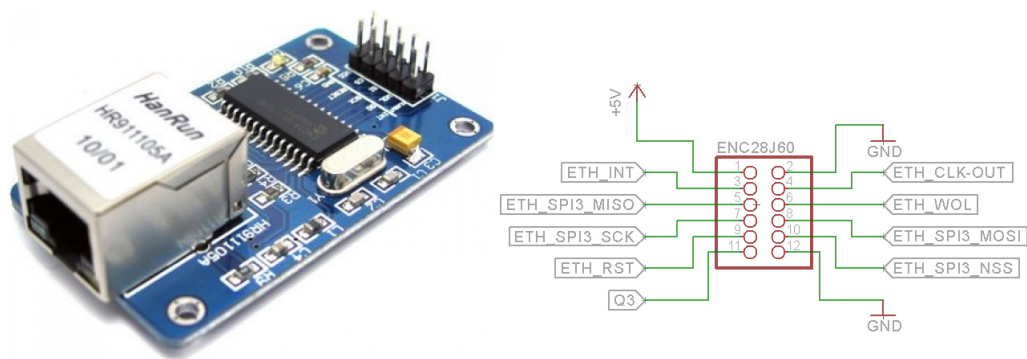
Jedná se o obvod, který slouží jako fyzická vrstva sběrnice CAN a převádí data na elektrické signály a opačně. Do tohoto obvodu vstupuje CAN jako RX a TX z MCU a na stranu sběrnice vychází jako CAN Low a CAN High.



Obr. 34 – CAN – Schéma zapojení

4.4.6.3 Ethernet

Protože Ethernet není standardním vybavením MCU z řady STM32L4, bude pro zajištění komunikace po této sběrnici využít externí sériově vyráběný modul [10]. Tento modul obsahuje IO firmy Microchip ENC28J60. Jedná se o ethernet controller pro sběrnici SPI, která je v MCU hardwarově podporovaná. Modul je napájen z interního 5V měniče, a jsou využity všechny jeho piny s výjimkou Q3. Kromě sběrnice SPI, jsou také k modulu přivedeny některé GPIO piny. ETH_RST slouží k dálkovému restartu modulu z MCU. ETH_WOL (Wake On Lan), který je přiveden na WakeUp pin MCU, slouží k jeho probuzení pomocí této funkce.



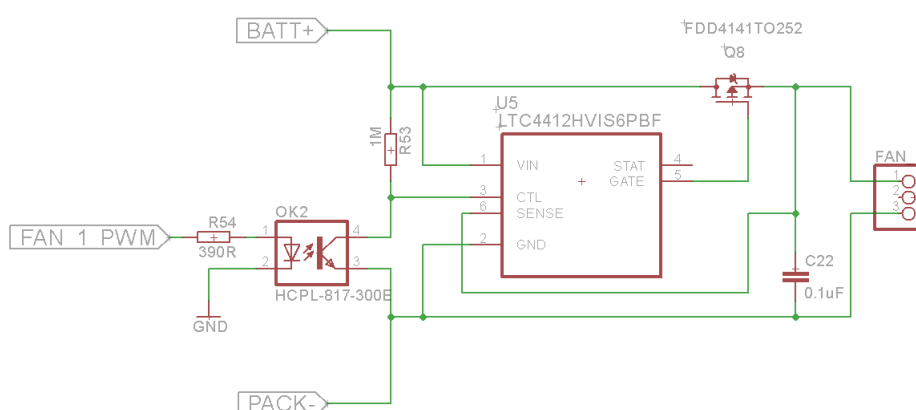
Obr. 35 – Ethernet modul – Schéma zapojení

Další výhodou využití tohoto modulu je množství podpůrných SW knihoven, protože se jedná o často využívaný modul např. pro platformu Arduino nebo i pro platformu STM32 [9].

4.4.7 Ostatní systémy

Mezi další integrované systémy patří např. systém řízení ventilátorů, tlačítka nouzového vypnutí a paměť pro dlouhodobé sběry dat.

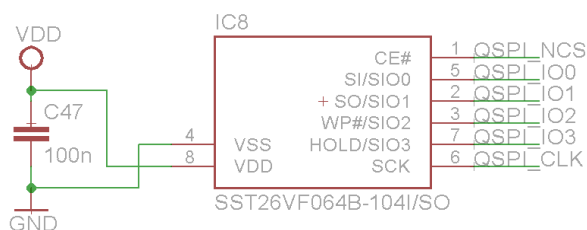
Bylo rozhodnuto o implementaci dvojice spínacích, popř. regulačních MOS-FETů pro řízení ventilátorů. Předpokládá se umístění jednoho ventilátoru přímo ve zdrojovém modulu, protože všechny výše popsané komponenty integrované v tak malém prostoru, především pak DC-DC měniče, budou vyzařovat poměrně velké množství tepla. MOS-FET Q8 je přes driver U5 spínán z MCU a zajišťuje spínání ventilátoru FAN_1 případně jeho regulaci pomocí PWM.



Obr. 36 – Řízení ventilátorů – Schéma zapojení

Zapojení pro druhý ventilátor je analogické jako zapojení na obr. 36. Protože je systém zapojen za BMS, bez přídavného měniče, počítá se s využitím 24V ventilátoru.

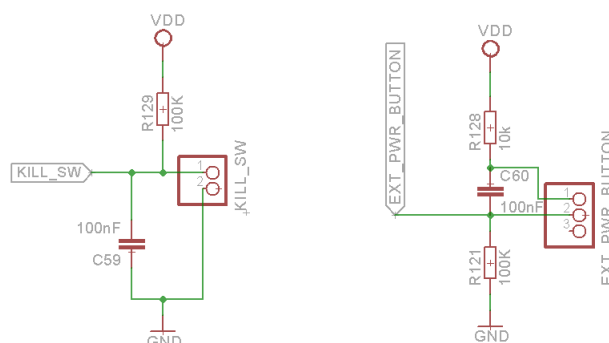
Dalším přidaným obvodem je paměť Quad SPI o kapacitě 4Mb, která by měla postačit na dlouhodobé záznamy měřených dat.



Obr. 37 – Paměť Quad SPI – Schéma zapojení

Paměť je k MCU připojena čtveřicí SPI linek, což zajistí dostatečně rychlé ukládání v případě, že by paměť byla využita k real-time záznamu dat s velkou frekvencí měření.

Mezi další přídavné systémy patří dvojice tlačítek na obr. 38. Jedno slouží jako tlačítko nouzového zastavení Central-STOP, druhé může sloužit k manuálnímu zapnutí modulu. Toto tlačítko však nemusí být vůbec zapojeno, protože modul se automaticky zapne, jakmile bude překročena Stand-By spotřeba, tedy např. zapnutím řídicího systému. Kondenzátory C59 a C60 mají sloužit k eliminaci překmitů při stisknutí tlačítka.



Obr. 38 – Tlačítka – Schéma zapojení

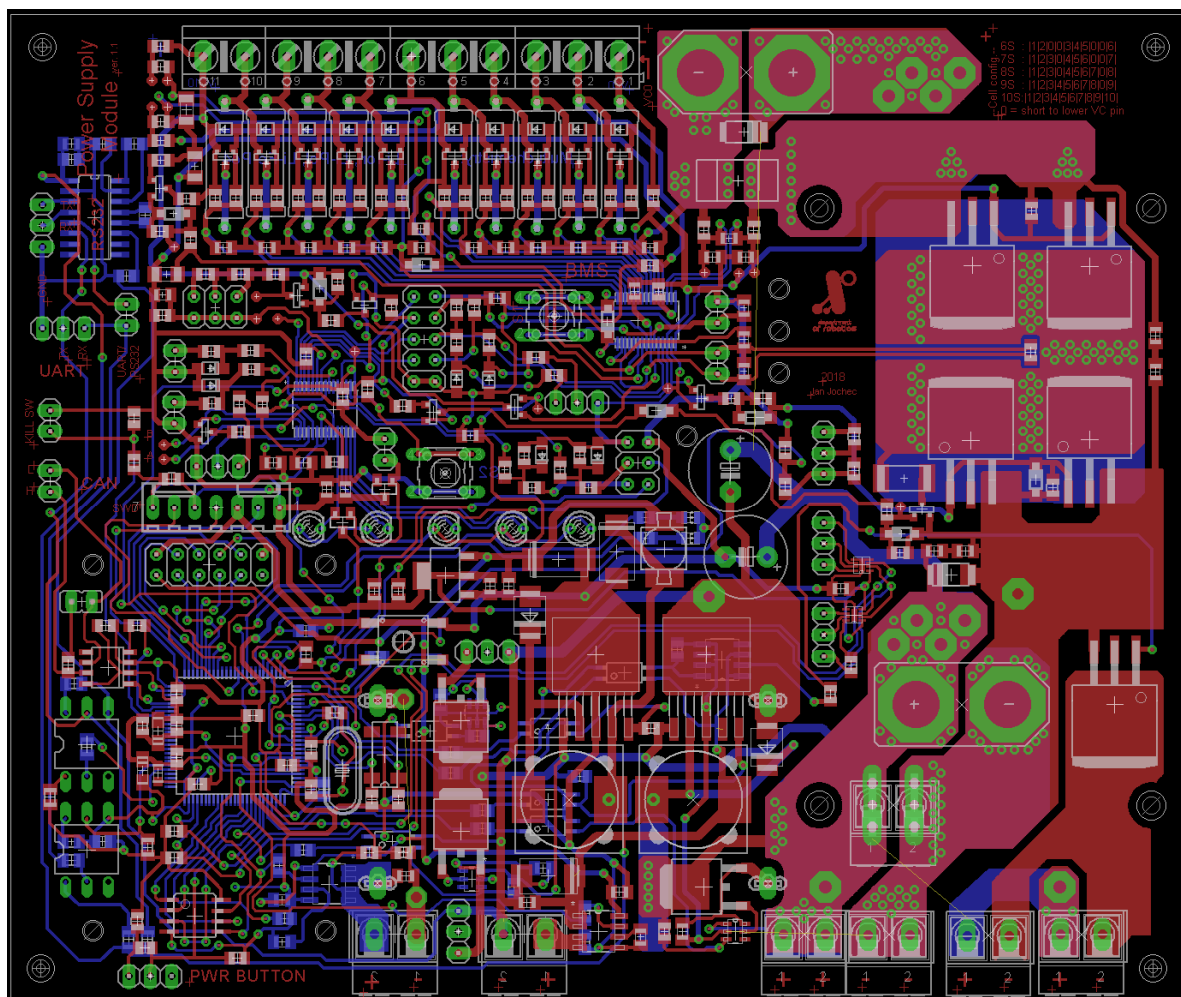
4.5 PCB Design

Po dokončení celého schématu byla ještě provedena kontrola Electrical-Rule Check v SW Eagle, který kontroluje překryv vodičů ve schématu a další pravidla pro tvorbu schémat. Celé schéma je přiloženo v příloze [1] ve formátu .pdf.

Následně bylo přistoupeno ke tvorbě plošného spoje. Při vývoji PCB byl kladen důraz na následující požadavky:

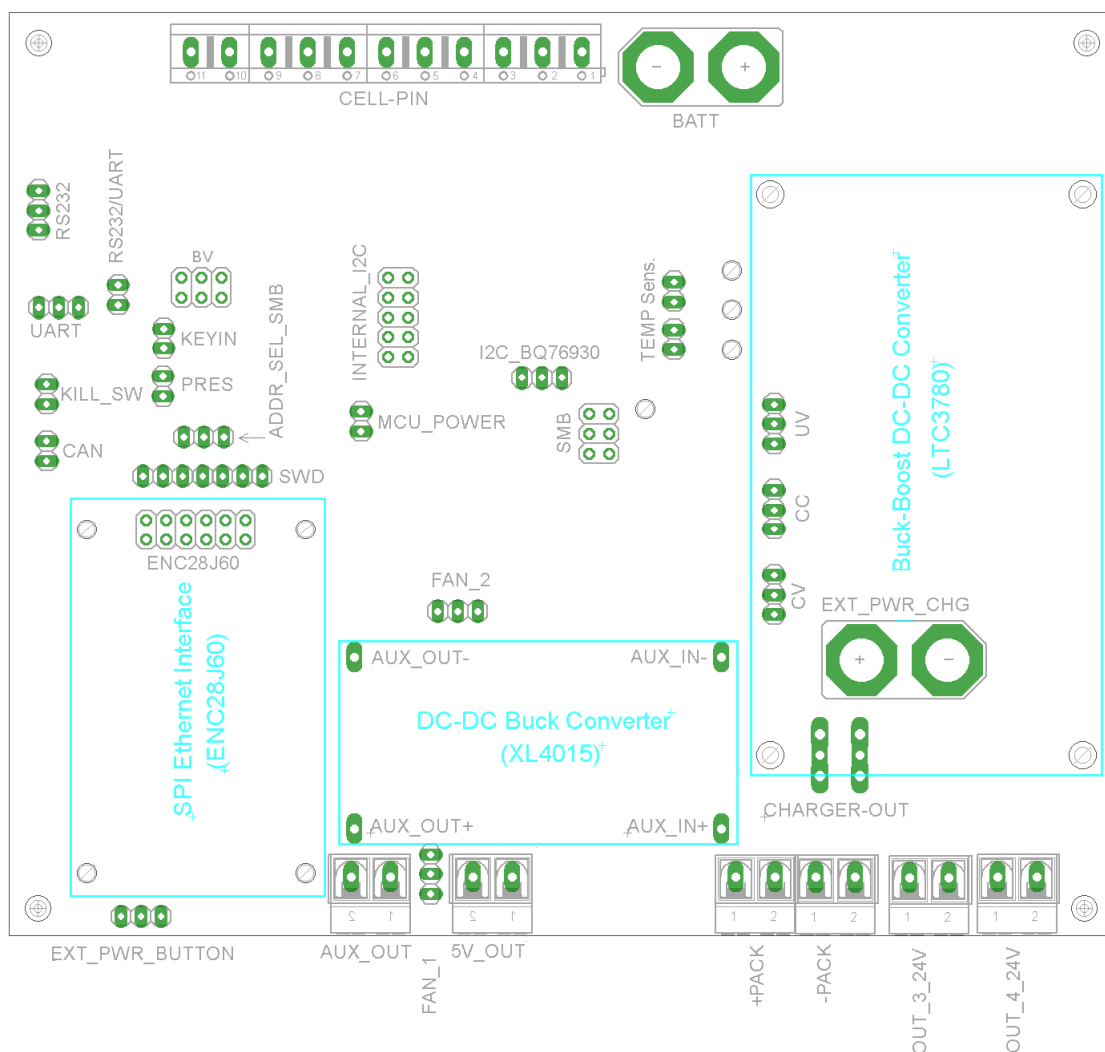
- Dvouvrstvý plošný spoj (omezení výrobou)
- Co nejmenší velikost
- Možnost nasadit výše zmíněné externí moduly (připojovací rozměry a konektory musí sedět)
- Maximální využití SMD součástek
- Jedna strana bude osazena pouze plochými součástkami, bude sloužit jako čelní panel
- Výkonové cesty budou dostatečně široké, nebo budou nahrazeny propojkami
- Deska zajistí chlazení všech součástek (aby nebylo třeba externích chladičů)
- Bude přihlédnuto k proudění vzduchu okolo desky
- Budou zachovány zásady zemnění k jednomu bodu (eliminace zemních smyček)
- Zachování zásad předepsaných výrobcí IO v místech jejich implementace

S dodržením výše uvedených zásad pro design byl následně navržen PCB o rozměrech 142x120mm. Jedná se o oboustranně osazený plošný spoj, který navíc obsahuje sedm výkonových propojek. Kompletní návrh desky s popisky a hodnotami součástek je přiložen v příloze [1] ve formátu Eagle souboru .brd.



Obr. 39 – PCB – Návrh

V určitých místech budou na desce nasazeny další tři moduly popsány výše. Jedná se o dva měniče a ethernet modul. Místa nasazení těchto modulů na desku je znázorněno na obr. 40. na následující straně. Na tomto obrázku jsou také popsány jednotlivé konektory, svorkovnice a přípojná místa.



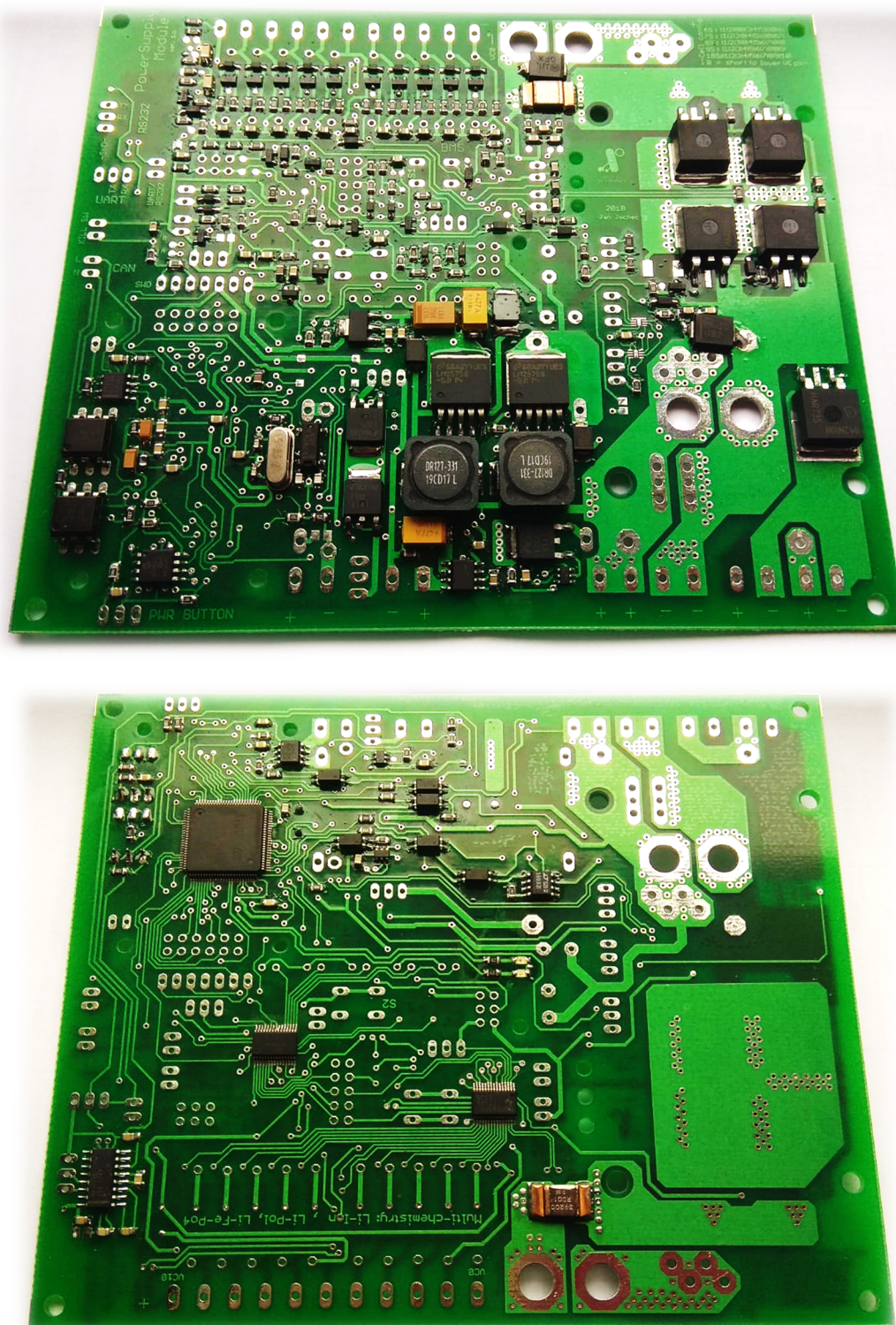
Obr. 40 – PCB – Popis

Moduly budou vždy spojeny s deskou v místě konektorů, případně také v místech upínacích děr šrouby a distančními sloupky. DC-DC měniče jsou navíc uloženy tak, aby v případě umístění ventilátoru doprostřed nad desku, vzduch proudil přes tyto moduly a horký odcházel po krajích desky.

Následně byla deska v SW Eagle prověřena kontrolou DRC (Design-Rule Check), která kontroluje zapojení se schématem z hlediska vodivosti a izolační vzdálenosti mezi jednotlivými cestami. Na desce byly následně doladěny poslední detaily a ve verzi 1.1 byla odeslána do výroby.

4.6 Testování zdrojového subsystému

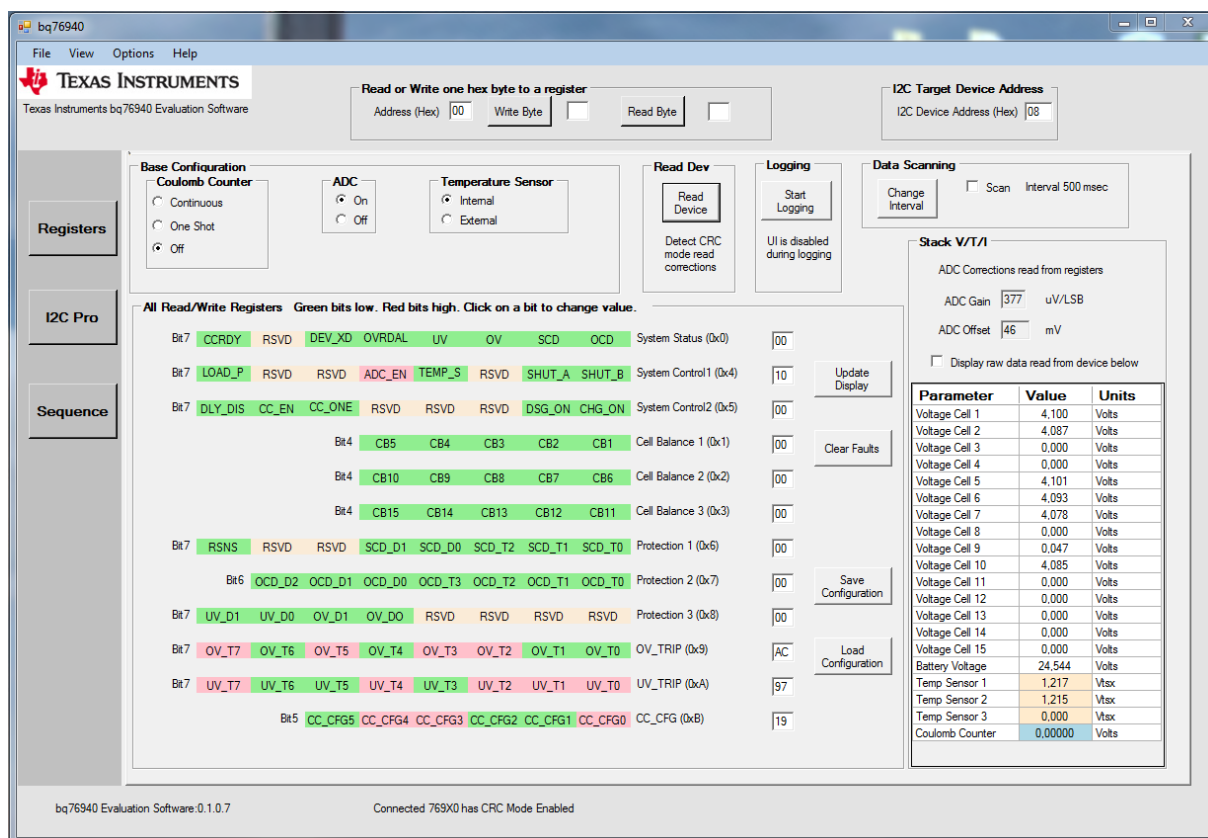
Vyrobená deska (viz obr. 41) byla následně osazena piny a doplněna jumpery na příslušné pozice, a jednotlivé systémy začaly být postupně ožiovány.



Obr. 41 – Vyrobený PCB

4.6.1 Oživení

Nejprve byla připojena série rezistorů simulující 6S baterii na vstupní VCx piny balancéru, a byla ověřena funkce AFE. K tomu byl využit originální diagnostický SW firmy Texas Instruments, připojený na sběrnici I2C pomocí převodníku EV2300. Z obr. 42. je zřejmé, že jsou články zapojeny správně a celkové napětí Battery Voltage odpovídá součtu všech článků. Na straně registrů vidíme, že v systému není překročena žádná prahová hodnota (UV, OV atd.), AFE tedy pracuje správně a simulovaná baterie je zapojena na správné vstupní piny.

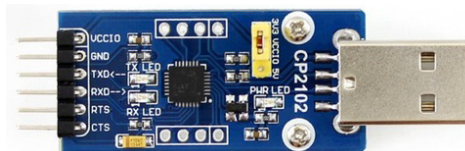


Obr. 42 – Diagnostika AFE

Poté byl oživen obvod Gas Gauge a následně přidáním jumperu MCU_POWER poprvé připojeno napájení MCU a přes rozhraní SWD nahrán testovací kód. Ten měl za úkol pouze blikat jednou z LED na předním panelu a ověřit tak, že tento chip funguje. Poté byl z MCU povolen interní DC-DC měnič a pro kontrolu změřeno napětí na obou vnitřních větvích. Poté mohly být postupně ožiovány další systémy, počínaje sériovou linkou. Ta je nezbytná pro komunikaci s PC.

4.6.2 Propojení s PC a programování MCU

Následně byl zdrojový subsystém propojen s PC pomocí sériové linky a převodníku z USB na UART.



Obr. 43 – Převodník USB - UART

Poté byl v SW Keil uVision 5 napsán zdrojový kód pro MCU, který umožňuje vyčítat všechny potřebné hodnoty po SMBus, a je schopen je odesílat po sériové lince do PC nebo jiného nadřazeného systému robotu. Na obr. 44 je část zdrojového kódu pro SMBus komunikaci a vyčítání zbývajících kapacity baterie. Kompletní zdrojový kód je přiložen v příloze [2].

```
/* Initialize all configured peripherals */
MX_GPIO_Init();
MX_I2C2_SMBUS_Init();
/* USER CODE BEGIN 2 */

//komunikace SMBus

/*##-1- Send Temperature Read Command #####*/
if (HAL_SMBUS_Master_Transmit_IT(&hsmbus2, SMB_ADDRESS, (uint8_t *)buffertx, 1, SMBUS_AUTOEND_MODE) != HAL_OK)
{
    __NOP();
}
while(HAL_SMBUS_GetState(&hsmbus2) != HAL_SMBUS_STATE_READY);

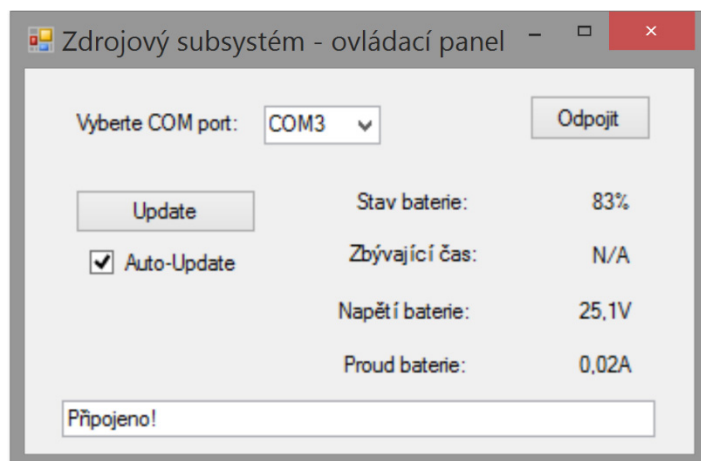
/*##-2- Retrieve Temperature Data Byte #####*/
if (HAL_SMBUS_Master_Receive_IT(&hsmbus2, SMB_ADDRESS, (uint8_t *)bufferrx, 2, SMBUS_AUTOEND_MODE) != HAL_OK)
{
    __NOP();
}
while(HAL_SMBUS_GetState(&hsmbus2) != HAL_SMBUS_STATE_READY);

capacity = bufferrx[0] | (bufferrx[1] << 8);
```

Obr. 44 – Keil – Komunikace po SMBus – Zdrojový kód

4.6.3 SW Komponenta pro PC

Pro ověření funkcí zdrojového subsystému byla vytvořena základní SW komponenta pro PC v SW Microsoft Visual Studio 2013. K programování byl využit jazyk C#. Tato komponenta má demonstrovat základní funkce zdrojového subsystému, vyčítat z něj některé parametry a případně usnadnit jeho následovnou SW implementaci do řídicího systému MR.



Obr. 45 – Aplikace pro PC

Aplikace komunikuje s modulem po sběrnici UART a komunikace je řešena vlastním komunikačním protokolem. Aplikace odesílá na zdrojový subsystém vždy jeden byte, konkrétně ve formě znaku. Modul následně rozpozná, o který znak se jedná a odešle zpět čtyři byty. První byte je opět znak (identifikátor) který určuje, jaká hodnota je ve dvou následujících bytech. Např.: pokud je požadována hodnota napětí na baterii, aplikace odešle na zdrojový modul znak 'u' a následně modul odešle zpět řetězec např. ve tvaru 'u 83' kde jako oddělovací znak identifikátoru od návratové hodnoty je mezera.

Kliknutím na tlačítko Update se odešle postupně série příkazů k vyčítání daných hodnot z MCU a jejich výsledky jsou následně rozděleny do příslušných polí s přiřazenými jednotkami. V této variantě ještě není vypočten zbývající čas, protože zdrojový modul byl zapojen pouze na regulovaném zdroji v režimu testování (bez jumperu PRES). Gas Gauge tedy nemá dostatek informací pro určení zbývajícího času. Tato aplikace je připojena v příloze [3].

5 Závěr

Cílem diplomové práce byl vývoj univerzálního zdrojového subsystému pro mobilní robotiku. Nejprve byla vypracována rešerše typů akumulátorů a obvodů pro práci s nimi, která navázala na bakalářskou práci [1]. V rámci rešerše byl také realizován plošný spoj jednoduchého BPS, který byl následně testován a využit pro potřeby katedry. Následně byl sestaven požadavkový list na kompletní zdrojový subsystém a specifikován postup dalšího řešení.

V rámci technického řešení byl nejprve navržen BMS, který byl následně vyroben a testován. Na základě těchto testů byl návrh doplněn o MCU a další měřící, spínací a komunikační obvody, které dohromady tvoří celý zdrojový subsystém. Poté bylo navrženo schéma zapojení celého zdrojového subsystému a následně realizován plošný spoj. Ten byl dále oživen a testován. K modulu byl následně formou aplikace pro PC vytvořen jednoduchý ovládací panel, který demonstruje jeho funkce. Tento modul byl dle zadání koncipován tak, aby mohl být nasazen v konkrétním MR, Roveru K3P4 pro soutěž European Rover Challenge. V průběhu celého návrh však byl kladen důraz na univerzálnost tohoto modulu v rámci všech 24V robotických systémů.

Už ve fázi návrhu schématu se ukázalo, že oblast BMS a power-managementu obecně je poměrně komplexní oblastí elektroniky. Zvláště pak v případě, že je nutné návrh řešení uvedený v katalogu výrobce doplnit o další podpůrné obvody a přitom zachovat jeho původní funkce. Další komplikací při návrhu je fakt, že každé přidané zařízení či obvod je potřeba nějakým způsobem napájet, a je tedy nutné určit zdroj jeho napájení. Každý obvod, i když je v úsporném režimu, má svou nízkou klidovou spotřebu, která však z dlouhodobého hlediska může mít za následek vybití baterie. Veškeré přídavné obvody a periferní zařízení musí být tedy napájeny pouze tehdy, kdy jsou opravdu potřeba. Trvale napájené obvody (např. MCU) musí mít možnost snížit svou spotřebu v době nečinnosti na minimum.

V tomto HW řešení byla snaha vytvořit modul univerzální, obsahující všechny periferie na jediném PCB. Aktuálně vyrobená deska o rozměrech 142x120 [mm] proto obsahuje přes 350 součástek, z níž většina je SMD. To je k ručnímu osazování opravdu velmi časově náročné, navíc se tím zvyšuje pravděpodobnost chyby. Proto je toto řešení poměrně komplikované v malosériové výrobě, a hodilo by se spíše v případě, že by se tato deska vyráběla ve velkých sériích a osazovala na osazovacím stroji.

K dalšímu řešení se nabízí rozdělit desku na jednotlivé moduly podle funkcí, které by byly lépe vyrobitelné v malých sériích, snadněji by se oživovaly a implementovaly by se do robotu pouze tehdy, pokud by byly opravdu potřeba. Celá struktura zapojení by tedy se rozdělila na modul BMS, který by se implementoval vždy, a v případě potřeby by se na něj nasadily potřebné další moduly ve formě shieldu.

Poděkování

Děkuji vedoucímu práce Ing. J. Babjakovi, PhD. za pomoc při vývoji desky a cenné rady při programování MCU. Dále děkuji Ing. Antonínu Friedovi z ST Microelectronics Design & Application s.r.o. za podporu ve formě vývojového HW a rady.

6 Použité zdroje a literatura:

[1] JOCHEC, Jan. *Energetické zdroje MR* [online]. Ostrava, 2015

[online] [cit. 2018-05-07]. Dostupné z: <https://dspace.vsb.cz/handle/10084/109600> Bakalářská práce.

Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.

[2] AnalogDevices. *Battery Management Systems*

[online] [cit. 2018.08.03]. Dostupné z: <http://www.analog.com/en/parametricsearch/11426>

Katalog firmy Analog Devices (dříve Linear-Technology).

[3] Texas Instruments. *Datasheet bq78350-r1 Gas Gauge integrated circuit*

[online] [cit. 2015.13.05]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symmlink/bq78350-r1.pdf>

Katalogový list IO pro bateriový management *bq78350-r1*.

[4] Texas Instruments. *Datasheet bq76930 AFE integrated circuit.*

[online] [cit. 2015.13.05]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/slusbk2g/slusbk2g.pdf>

Katalogový list IO pro bateriový management *bq76930*.

[5] Texas Instruments. *Instruction manual bq76930 AFE EVM.*

[online] [cit. 2015.13.05]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ug/slvu925b/slvu925b.pdf>

Manuál k vývojovému modulu IO *bq76930*.

[6] ST Microelectronics. *Datasheet STM32L476 Ultra-Low-Power Microcontroller*

[online] [cit. 2015.13.05]. Dostupné z:

<http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/c5/ed/2f/60/aa/79/42/0b/DM00108832.pdf/files/DM00108832.pdf/jcr:content/translations/en.DM00108832.pdf>

Katalogový list mikro-kontroléru *STM32L476*

[7] Analog Devices. *Datasheet LTC3780 Buck-Boost DC-DC converter.*

[online] [cit. 2015.13.05]. Dostupné z: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/3780ff.pdf>

Katalogový list firmy Analog Devices – Buck-Boost DC-DC měnič *LTC3780*.

[8] Dexhal. *Product Catalogue – LTC3780 DC-DC Converter PCB.*

[online] [cit. 2015.13.05]. Dostupné z: https://dexhal.cz/step-updown/484-10a-buck-boost-dcdc-menic-napeti-konvertor_el-vc-bb-2.html#popis

Katalog firmy Dexhal.

[9] STM32 Blog. *Server http na STM32*.

[online] [cit. 2015.13.05]. Dostupné z: <https://stm32.eu/2013/05/06/serwer-http-na-stm32/>

Blog obsahující návody k využití MCU firmy ST Microelectronics – *STM32 jako http server*

[10] E-Shop catalogue. *Ethernet modul ENC28J60*.

[online] [cit. 2015.13.05]. Dostupné z: <http://www.santy.cz/moduly-c22/ethernet-arduino-mega-uno-2560-1280-328-hr911105a-online-sd-enc28j60-mini-i146/>

E-Shop Santy.cz – *Ethernetový modul s SPI rozhraním postavený na chipu ENC28J60*.

[11] E-Shop catalogue. *DC-DC Converter module XL4015*.

[online] [cit. 2015.13.05]. Dostupné z: <https://www.techtronics.in/products/xl4015-2-5a-lithium-charger-dc-dc-buck-converter-step-down-power-module>

E-Shop Techtronics – *Modul DC-DC Měníče s obvodem XL4015*.

7 Seznam příloh

Všechny přílohy jsou uloženy v elektronické podobě na přiloženém CD

- [1] Schéma a PCB – Soubory Eagle a PDF
- [2] Program pro MCU – zdrojový kód a konfigurační soubor z STM32 Cube MX
- [3] Aplikace pro PC – spustitelný soubor .exe a zdrojový kód aplikace
- [4] Datasheety – Katalogové listy využitých součástek
- [5] Konfigurační SW – Program Battery Management Studio a ovladače k modulu EV2300
- [6] BPS pro 12V systémy – Soubory Eagle, pdf a datasheety k využitým součástkám